Conseil national de recherches Canada
Division des recherches en bâtiment

National Research Council Canada
Division of Building Research

Regard 84: Science du bâtiment

Compte rendu et renseignements supplémentaires

PERFORMANCE des MATÉRIAUX en SERVICE

DRB
Canada

87-04635/

Cette publication fait partie d'une série de rapports publiés par la Division des recherches en bâtiment du Conseil national de recherches du Canada. Il est interdit de publier un résumé du présent document sans la permission écrite de la Division. Des extraits peuvent être cités pour les besoins d'une critique seulement.

On peut obtenir une liste des publications de la DRB/CNRC en écrivant à la Section des publications, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Ontario, Canada, K1A 0R6, Téléphone (613) 993-2463.

© Conseil national de recherches du Canada 1986

PERFORMANCE DES MATÉRIAUX EN SERVICE

Compte rendu du Regard 84 sur la science du bâtiment
octobre et novembre 1984

La coordination de cette publication a été assurée par
R.L. Quirouette

Compte rendu n° 11
de la
Division des recherches en bâtiment

Prix 5 $ Ottawa, mai 1986 CNRC 24968F

A V A N T - P R O P O S

La Division des recherches en bâtiment a recours à différentes méthodes pour diffuser les résultats de ses recherches à l'industrie de la construction. Le programme "Regard sur la science du bâtiment" est l'un des moyens les plus efficaces dont dispose la Division pour assurer une analyse directe et complète d'un problème actuel et souvent controversé en matière de performance du bâtiment. Il s'agit également d'une bonne occasion pour le chercheur de bénéficier de l'expérience des personnes qui doivent appliquer les principes de la science du bâtiment dans leurs travaux de conception et de construction.

Le programme "Regard 84 sur la science du bâtiment", dont le thème était "La performance des matériaux en service", a été présenté dans huit villes canadiennes et a été suivi par plus de 700 participants. Le présent compte rendu contient l'essentiel des exposés et des discussions qui ont eu lieu en octobre et novembre 1984.

Le directeur de la DRB,
G. Seaden

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Préface	1
Durée de service de l'enveloppe du bâtiment par J.-C. Perreault	5
Performance des façades de pierre par K.N. Burn	13
Enduits, adhésifs et produits d'étanchéité par H.E. Ashton et R.L. Quirouette	29
La détérioration des garages de stationnement par G.G. Litvan	43
Questions et réponses	53
Lectures complémentaires	60

PRÉFACE

Le programme "Regard 84 sur la science du bâtiment" est le vingt-quatrième de la série de séminaires-ateliers présentés par la Division des recherches en bâtiment depuis 1964. Le programme vise généralement à fournir une explication scientifique aux problèmes qui affectent la performance des bâtiments et notamment celle des matériaux de construction. Il porte en partie sur les nouveaux matériaux lancés sur le marché pour concurrencer les matériaux existants et surtout sur les matériaux traditionnels qui ne se comportent plus aussi bien qu'avant. L'objectif n'est pas de condamner ou recommander l'usage de certains matériaux ou produits mais plutôt de partager les connaissances acquises sur le comportement de l'enveloppe du bâtiment et de ses composantes.

Regard 84 s'adresse aux architectes, ingénieurs, enseignants, constructeurs, fournisseurs et agents du bâtiment, ainsi qu'à toutes les autres personnes qui participent à la conception et la construction des bâtiments.

Les bâtiments sont construits avec des matériaux et lorsqu'une défaillance se produit, c'est habituellement parce qu'un matériau ou un ensemble de matériaux n'a pas joué son rôle. Par exemple : une fenêtre qui s'embue, une brique qui éclate, l'acier qui se corrode, une membrane de couverture qui se fend, un enduit qui se décolore ou pèle, etc. Lorsque ces défaillances se produisent, on jette souvent le blâme sur la piètre qualité de l'exécution, ou si celle-ci est irréprochable, sur la mauvaise qualité des matériaux.

L'examen d'un grand nombre de cas de défaillance des matériaux nous a amenés à conclure que d'autres facteurs interviennent davantage. Les matériaux peuvent être incompatibles avec l'environnement dans lequel ils sont utilisés ou l'environnement peut avoir changé par rapport aux conditions initiales; cependant, dans la plupart des cas, les propriétés des matériaux choisis ne leur permettent pas de remplir la fonction pour laquelle ils sont employés.

Le but essentiel du programme Regard 84 est d'étudier la performance des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments. Toutefois, comme il est impossible de traiter de tous les matériaux, les exposés porteront surtout sur la fonction, la performance et la durabilité des matériaux lorsque ces sujets présentent un intérêt particulier et qu'il existe suffisamment d'information pour la communiquer aux participants. Parmi les sujets retenus, mentionnons la détérioration des garages de stationnement, la performance des revêtements, adhésifs et produits d'étanchéité, la performance des façades de pierre. Pour permettre de situer ces sujets dans leur contexte, un exposé général traitera de la performance des bâtiments et abordera les questions qui présenteront le plus grand défi au cours de la prochaine décennie.

ITINÉRAIRE ET STATISTIQUES

Les séminaires-ateliers du Regard 84 sur la science du bâtiment ont été tenus dans huit grandes villes canadiennes : Halifax, Québec, Montréal, Ottawa, Toronto, Winnipeg, Edmonton et Vancouver. Des séances

additionnelles ont été présentées à Toronto et à Montréal et d'autres se sont déroulées en français à Montréal et à Québec.

Au total, 740 personnes ont participé aux sessions qui se sont tenues au Canada. De ce nombre, 16 % étaient des architectes, 7 % des ingénieurs-conseils, 5 % des techniciens et technologues, 15 % des directeurs de travaux, 3 % des représentants du secteur de la fabrication de matériaux, 4 % des enseignants, 8 % des représentants des services municipaux d'inspection; les autres (42 %) n'ont pas indiqué leur profession ou représentaient des intérêts ou des corps de métiers divers.

QUELQUES MOTS SUR LES AUTEURS

Les séances du Regard 84 sur la science du bâtiment ont été présentées en anglais et en français, ce qui a nécessité la participation de nombreux conférenciers. Les principaux étaient H.E. Ashton, K.N. Burn, G.G. Litvan et R.L. Quirouette, de la Division des recherches en bâtiment; J.-C. Perreault de PCL Construction, à Edmonton; R. Roux de l'École polytechnique de Montréal et M. Petrone de Petrone Architecte de Longueuil, au Québec. Ces deux derniers conférenciers n'ont participé qu'aux séances présentées en français à Montréal et à Québec.

Les principaux auteurs des articles qui suivent sont : J.-C. Perreault de PCL Construction, K.N. Burn, H.E. Ashton, R.L. Quirouette et G.G. Litvan, tous membres de la Division des recherches en bâtiment.

ATELIERS

Les après-midi étaient consacrés aux discussions. L'auditoire était divisé en deux groupes, chacun sous la supervision de deux auteurs qui agissaient comme animateurs. Les ateliers donnaient l'occasion aux participants de discuter des sujets techniques présentés à la session du matin. Chaque atelier durait une heure et quart et, après une pause-café, les groupes alternaient pour participer à un second atelier avec les deux autres animateurs.

Durant ces ateliers, de nombreux points ont fait l'objet de discussions. Les animateurs ont pris en note un certain nombre de questions et de réponses qui ont été incluses à la toute fin de ce compte rendu.

REMERCIEMENTS

Le succès du programme Regard 84 sur la science du bâtiment repose en grande partie sur le matériel visuel utilisé pour bien communiquer les informations. Nous remercions particulièrement Don Hobbs, du Service de conception graphique de la DRB, pour la préparation des dessins et des photographies.

Nous remercions également Gail LeBlanc, Marie Charette et Marie-Anne Beaulieu du zèle infatigable dont elles ont témoigné pour dactylographier les multiples versions des articles, préparer les documents

d'inscription et pour le service de renseignements qu'elles ont assuré durant la préparation et la réalisation du programme.

Regard 84 sur la science du bâtiment a bénéficié du concours d'un grand nombre de personnes qui ont mis au point et préparé le matériel technique nécessaire. Il convient de remercier tout particulièrement Chris Leggett de Legget Architects, Ron Brand de l'Université Carleton et Dennis Watson et Gary Blackhouse de Tremco Limitée pour leurs très nombreuses suggestions sur le contenu technique et les règles de l'art.

Nous remercions également Jim Bagby de Adamson and Associates, pour son assistance et les informations techniques sur la technologie des façades de pierre. Nous remercions Paul Robitaille de Granicorps, à Québec, pour l'information technique sur la fabrication et l'utilisation du granite comme matériau de façade.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance aux personnes suivantes : Richard Roux de l'École polytechnique et Mario Petrone de Petrone Architecte, pour le temps qu'ils ont consacré à la préparation et à la présentation à Montréal et à Québec de deux communications en français; Daniel Bourgeois, pour la révision des textes traduits en français.

Finalement, et surtout, nous vous remercions de l'intérêt que vous portez au transfert des connaissances dans le domaine de la science du bâtiment.

B.F. Stafford, administrateur du programme
R.L. Quirouette, coordonnateur du programme

DURÉE DE SERVICE DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

par

J.-C. Perreault

AVANT-PROPOS

Dans son exposé intitulé "Durée de service des bâtiments", J.-C. Perreault a eu recours à des douzaines de diapositives pour illustrer les défaillances du bâtiment et des matériaux. Le "message" de la communication, si l'on peut s'exprimer ainsi, serait perdu sans ces nombreuses illustrations; nous avons par conséquent essayé d'en extraire l'essentiel. Le réviseur et l'auteur sont d'avis que le titre suivant serait plus approprié : "Durée de service de l'enveloppe du bâtiment".

INTRODUCTION

La durée de service d'un bâtiment est la période pendant laquelle ce bâtiment remplit les fonctions pour lesquelles il a été construit, ne présente aucune défaillance importante et n'entraîne pas des frais d'exploitation trop élevés. De nombreux facteurs contribuent à la durée de service d'un bâtiment. Parmi ceux-ci, mentionnons la qualité de la construction et de la conception, l'environnement et le choix des matériaux. Le nombre d'années qu'un bâtiment restera érigé importe moins que la qualité des services qu'il peut rendre. Les principaux composants d'un bâtiment comme les fondations, les éléments structuraux et l'enveloppe, doivent tous offrir un bon rendement si l'on veut obtenir une durée de service acceptable. Même si les fondations et la structure sont rarement l'objet de défaillances, l'enveloppe du bâtiment semble de plus en plus sujette à des désordres ennuyants et coûteux, qui peuvent parfois menacer l'intégrité du bâtiment.

Compte tenu de la technologie actuelle, il devrait être possible de prévoir la performance de l'enveloppe d'un bâtiment. La prévision de la performance des matériaux ou des ensembles de matériaux est une étape essentielle du processus de conception*. Il ne fait aucun doute que le faible rendement de certains bâtiments et d'un grand nombre d'éléments de construction peut être amélioré par le biais d'un effort concerté de la part des concepteurs, constructeurs, fabricants et chercheurs. La discussion qui suit portera principalement sur la durée de service ou la performance de l'enveloppe du bâtiment.

L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

L'industrie de la construction éprouve actuellement de nombreux problèmes avec les enveloppes de bâtiment et la dégradation prématurée des matériaux de construction : fuites d'eau par la toiture, condensations

---

*M.C. Baker, The Principles of Enclosure Design. Trousse audio-visuelle SS-78-145, distribuée par le Centre de photographie du gouvernement canadien, Office national du film, Parc Tunney, Ottawa, K1A 0M9.

interstitielles, matériaux de revêtement s'écaillant ou se tachant, efflorescence et défectuosité des revêtements extérieurs. Souvent, les éléments intérieurs d'un mur ou d'un toit sont à l'origine de défaillances bien que les causes soient moins évidentes : pare-vapeur qui ne joue plus son rôle, pare-vent inexistant ou perforé, seuils ou solins inclinés du mauvais côté, ou isolant thermique détaché de son support.

L'enveloppe des bâtiments modernes est soumise à des contraintes beaucoup plus importantes. Par exemple, l'utilisation d'isolant thermique dans les murs et le toit crée une séparation entre les revêtements intérieur et extérieur, qui fait que la température du revêtement extérieur risque d'être beaucoup plus élevée ou moins élevée que la température ambiante extérieure, alors que le revêtement intérieur de finition sera à la température ambiante intérieure. Ces écarts importants de température (rares avant l'utilisation d'isolants thermiques) imposent de nouvelles contraintes aux matériaux constitutifs des murs. Les températures intérieures doivent être maintenues dans des limites relativement étroites et le bâtiment doit être humidifié toute l'année pour assurer un meilleur confort aux occupants et accroître la durabilité de l'aménagement intérieur, ou, le cas échéant, pour assurer le bon fonctionnement de l'équipement informatique et la préservation des oeuvres d'art ou d'artisanat, etc. L'enveloppe d'un bâtiment doit être à l'épreuve des fuites d'air et des condensations de surface. Tous ces facteurs ont contribué à augmenter les contraintes exercées sur l'enveloppe et à l'intérieur de l'enveloppe, rendant par le fait même beaucoup plus complexe la prévision de sa performance.

CONCEPTION DE L'ENVELOPPE DU BÂTIMENT

Autrefois, les bâtiments étaient généralement très froids en hiver, transparents à l'air et relativement petits comparés à ceux d'aujourd'hui. L'enveloppe avait pour fonction de créer un environnement intérieur et de protéger les occupants ou les biens contre le vent, la neige et la pluie, avec un minimum d'entretien et un maximum de durabilité. Aujourd'hui, la conception des enveloppes de bâtiment vise les mêmes objectifs, mais avec une plus grande rigueur, et doit tenir compte de l'économie d'énergie. Pour atteindre ces objectifs, il faut être en mesure de prévoir la performance des matériaux et notamment de l'enveloppe du bâtiment. Cette prévision fait partie du processus de conception. À ce stade, il faut prendre soigneusement en considération les trois facteurs suivants : fonction, environnement et matériaux[1]. Lorsque la structure ou le support, l'isolant, les revêtements, le pare-vapeur et le pare-vent sont combinés pour former un ensemble, la performance de cet ensemble et de chacun des éléments doit être prévisible compte tenu des conditions de service. Il faut absolument procéder de cette façon si l'on veut éliminer graduellement les désordres.

LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES LORS DE LA CONSTRUCTION

Les bâtiments et les enveloppes de bâtiment sont conçus pour résister à certains facteurs environnementaux; cependant, une attention insuffisante est apportée aux conditions ambiantes lors de la construction et aux effets de ces conditions sur la durabilité des éléments. Bien que la plupart des matériaux constitutifs de l'enveloppe soient protégés des contraintes

imposées par l'environnement, nombre d'entre eux seront tout de même exposés, durant la construction, au rayonnement solaire, au vent et à la pluie, tant que le revêtement extérieur ne sera pas mis en place. Ils peuvent être exposés à la chaleur, au froid intense ou même à la pluie sur des périodes prolongées. Le soleil a un effet néfaste sur certains matériaux sensibles aux rayons ultraviolets. Ils peuvent subir de sérieux dommages avant même d'avoir la chance de jouer leur rôle. Les blocs de maçonnerie qui serviront à la construction du mur de remplissage peuvent être sévèrement trempés par suite d'une exposition prolongée aux intempéries. Bien que l'humidité ne soit pas dangereuse en elle-même, elle contribuera certainement à la détérioration des autres éléments une fois le mur refermé. Certains éléments qui ne sont pas conçus pour résister aux pressions du vent peuvent se rompre au cours de la construction en l'absence d'un support adéquat.

La conception de l'enveloppe d'un bâtiment exige de prendre en considération la date du début des travaux, la séquence d'assemblage, et les conditions d'exposition auxquelles sera soumis chaque matériau avant qu'il ne soit intégré à un ensemble de façon définitive.

TENUE EN SERVICE DES MATÉRIAUX

Les matériaux modernes sont conçus pour remplir des fonctions multiples. Individuellement, il est possible de prédire leur performance; cependant, lorsqu'ils sont intégrés à un ensemble, ils peuvent se comporter très différemment.

Vitrages

La plupart des enveloppes de bâtiments sont dotées de fenêtres, pour des raisons bien évidentes. Les caractéristiques des vitrages et leur performance sont généralement bien connues. Toutefois, lorsqu'une fenêtre ou un vitrage est encastré dans un revêtement extérieur de béton, il faut accorder une attention particulière au drainage de surface; si l'eau s'écoule directement du béton sur le vitrage, celui-ci risque d'être endommagé par l'action de la chaux contenue dans le béton. Cette attaque n'est pas visible et elle a pour effet de diminuer l'utilité de la fenêtre, au grand désarroi des occupants et du propriétaire du bâtiment. La plupart de ces désordres peuvent être évités si l'équipe de conception est consciente de ces phénomènes et des problèmes qu'ils peuvent entraîner.

Figure 1. Vitrage sévèrement endommagé par le ruissellement de l'eau de pluie contenant de la chaux dissoute.

Isolant thermique

Les isolants thermiques sont des matériaux bien connus. Ils ont pour fonction de résister à la transmission de chaleur. Mais quel sera leur rendement dans un mur? Quels seront les effets des autres composantes du mur sur l'isolant thermique? Est-ce que le mur une fois assemblé remplira toutes les fonctions pour lesquelles il a été construit?

Un isolant thermique subira peu de modifications durant sa durée de service. Toutefois, les matériaux placés de part et d'autre seront affectés par sa présence. En effet, ils seront plus froids d'un côté et plus chauds de l'autre. Si aucun dispositif pour limiter la migration de la vapeur d'eau n'a été prévu, il y a risque de condensation. Règle générale, un isolant thermique n'empêche pas la diffusion de vapeur d'eau ou l'écoulement de l'air humide. Cependant, l'isolant thermique crée un environnement dans lequel les risques de condensation sont plus élevés.

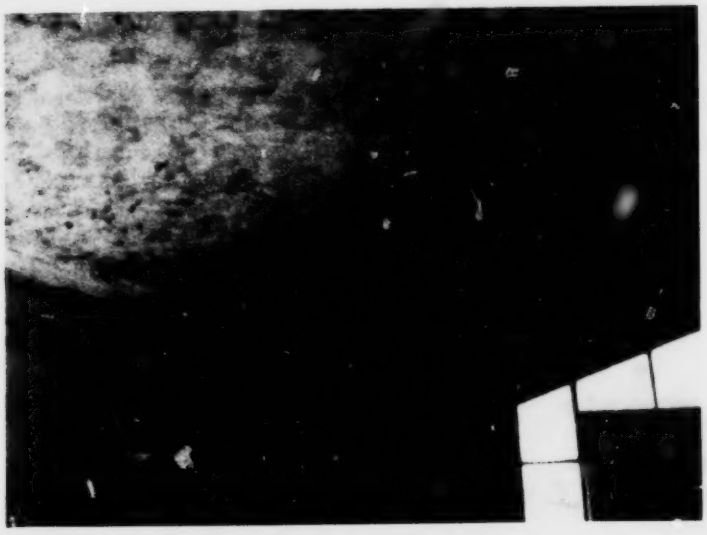


Figure 2. Isolant acoustique sérieusement trempé par la condensation de la vapeur d'eau entre l'isolant thermique et la dalle de béton.

L'utilisation d'isolant comme matériau d'insonorisation est un cas analogue. Lorsqu'on recouvre un mur extérieur ou un plafond d'isolant en fibres de verre, ce dernier joue également le rôle d'isolant thermique. Par conséquent, le revêtement extérieur est plus froid et les risques de condensation augmentent. Si l'isolant est recouvert d'un pare-vapeur, il se trouve à perdre ses propriétés au niveau de l'insonorisation. Il faut donc trouver d'autres moyens de réaliser l'isolement acoustique voulu.

Une technique courante consiste à fixer l'isolant rigide au mur de maçonnerie à l'aide d'un adhésif. Si le mur n'est pas doté d'un bon pare-vent, l'isolant risque de se décoller sous la pression du vent qui s'exerce sur l'enveloppe du bâtiment. L'adhésif aide à maintenir l'isolant thermique en place mais il n'est pas conçu pour résister à la différence de pression engendrée par le vent. L'isolant thermique n'a pas pour but d'agir comme pare-vent; pour être en mesure de jouer ce rôle, il faudrait revoir complètement les techniques de fixation. En résumé, le concepteur se doit

de considérer le mur comme un ensemble homogène afin de prévoir la performance de l'enveloppe d'un bâtiment.

Produits de scellement et de calfeutrage

Les produits de calfeutrage sont utilisés sans discernement dans l'industrie de la construction, souvent pour corriger des défauts, avec peu de chance de réussite. Même utilisés de façon appropriée pour calfeutrer des joints ou des fissures, la performance de ces produits est fonction des conditions environnementales qui existent lors de la construction. Un produit appliqué sur une surface métallique froide risque d'être comprimé si le métal se dilate au cours de la journée par l'action de la chaleur. Le durcissement du produit de calfeutrage se produira vraisemblablement lorsque ce dernier sera comprimé. La contraction du métal la nuit lorsqu'il fait plus froid peut entraîner la rupture du joint. Cette défaillance ne peut être attribuée à la qualité du matériau ou de l'exécution seulement; il faut également tenir compte des conditions climatiques au moment de l'application du produit.

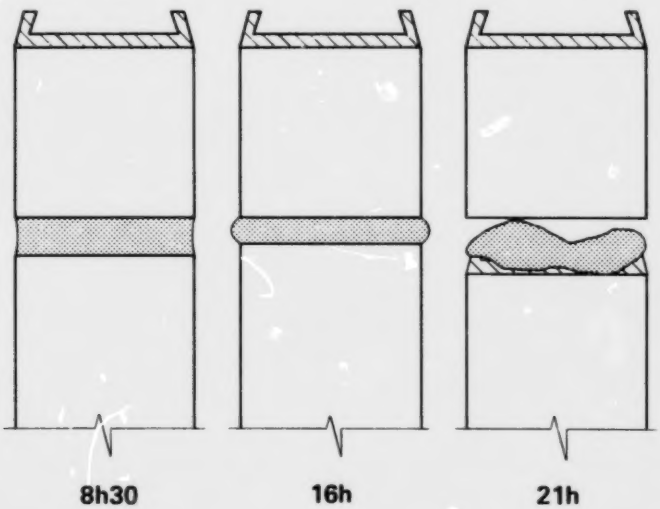


Figure 3. Joint entre deux meneaux d'un mur-rideau en aluminium.

Les vents très violents peuvent provoquer le déplacement du produit de calfeutrage avant qu'il n'ait eu le temps de durcir dans le joint. Encore une fois, il faut tenir compte de la fonction du matériau ainsi que des effets de la température et du vent sur sa mise en oeuvre.

Mastic

Le mastic devrait servir et sert souvent d'adhésif pour l'isolant. Il peut également être utilisé pour retarder la diffusion de la vapeur, à condition qu'il soit appliqué sur la surface de maçonnerie conformément aux recommandations du fabricant, et que sa durabilité soit acceptable. Il est souhaitable que le recouvrement soit continu, mais cela n'est pas absolument indispensable. De petites imperfections ne modifieront pas les caractéristiques de ce matériau.

Toutefois, les mastics ne peuvent pas jouer le rôle de pare-vent car ils ne permettent pas de boucher les ouvertures et les fissures qui se forment sur les surfaces de maçonnerie. De plus, ils ne peuvent être appliqués avec une épaisseur suffisamment uniforme pour agir comme une membrane adhérant mécaniquement à un substrat. Éventuellement, des fissures se formeront dans la maçonnerie, notamment au point de jonction avec les autres matériaux, et le mastic perdra sa continuité. Il ne sera plus en mesure d'agir comme pare-vent.

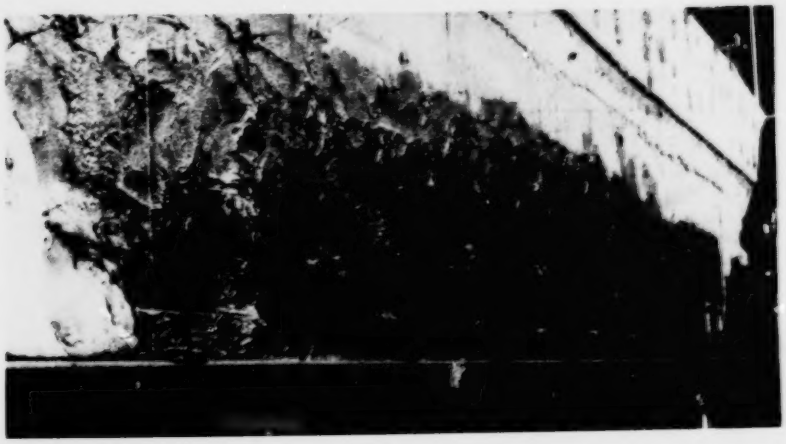


Figure 4. Le mastic utilisé ici comme pare-vent et pare-vapeur est d'application inégale et ne permet pas de remplir les vides au niveau des cornières en acier.

Feuille de polyéthylène

L'utilisation du polyéthylène comme pare-vapeur et pare-vent est une technique très discutable et de plus en plus fréquente à l'heure actuelle dans l'industrie de la construction. Or, si le polyéthylène accomplit bien sa première fonction qui est de résister au passage de la vapeur, il n'empêche pas le passage de l'air à travers un mur.

L'utilisation du polyéthylène comme pare-vent provient de la confusion qui existe dans l'industrie au sujet du rôle d'un pare-vapeur et du rôle d'un pare-vent. Pour retarder la diffusion de vapeur, il faut un matériau plus ou moins continu offrant une forte résistance au passage de la vapeur d'eau. Le matériau doit être appliqué du côté chaud de l'isolant thermique.

La fonction d'un pare-vent est totalement différente. Contrairement au pare-vapeur, il doit être parfaitement continu et doit le rester pendant toute la durée de service du bâtiment. Au lieu d'empêcher ou de retarder la diffusion de la vapeur, il doit empêcher l'écoulement d'air vers l'intérieur ou vers l'extérieur. Il doit par conséquent résister aux différences de pression de l'air causées par l'effet de tirage, la ventilation et le vent. Ce dernier facteur est le moins prévisible et peut provoquer des écarts de pression très importants de part et d'autre des murs ou du toit, imposant une pression très élevée sur le pare-vent.

Figure 5. Une feuille de polyéthylène fixée à un mur coupe-feu à l'aide d'un adhésif ne peut jouer le rôle de pare-vent.

Bien que la feuille de polyéthylène soit relativement résistante, elle risque de céder aux joints sous la pression du vent, entraînant ainsi une augmentation des fuites d'air. Le phénomène a été observé en laboratoire et sur le terrain. Même si la feuille de polyéthylène est prise en sandwich dans un ensemble comportant un support structural, ce sont les joints entre les éléments qui posent un problème majeur. Il existe d'autres méthodes pour enrayer efficacement l'écoulement d'air sur toute la surface y compris les joints, à un coût moindre qu'un mur "sandwich" comprenant une feuille de polyéthylène prise entre deux épaisseurs de plaque de plâtre.

Le choix du polyéthylène comme pare-vent dans l'enveloppe du bâtiment repose davantage sur des considérations traditionnelles que scientifiques. C'est une décision qu'il faut éviter de prendre si on veut obtenir une meilleure performance de l'enveloppe du bâtiment et par conséquent une plus longue durée de service des bâtiments.

CONCLUSION

La durée de service des bâtiments est directement proportionnelle à la durée de service de l'enveloppe. Au cours des dernières années, on a constaté une nette détérioration de l'enveloppe d'un grand nombre de bâtiments, à la consternation de tous. Les problèmes dont nous avons discuté précédemment surgissent de plus en plus fréquemment. Ceux-ci peuvent être résolus, mais les solutions doivent être puisées à même les connaissances scientifiques acquises grâce à l'expérience et la recherche.

La durée de service de l'enveloppe d'un bâtiment dépend directement des efforts déployés lors de la conception. Il est insuffisant et même risqué de copier simplement un détail de construction d'un projet précédent sans prendre en considération le nouvel environnement. L'enveloppe d'un bâtiment doit être conçue en tenant compte de l'avis du constructeur, du fournisseur de matériaux et des chercheurs. Le concepteur peut maintenant retenir les services d'un conseiller en science du bâtiment qui connaît bien les caractéristiques des matériaux, la qualité de la main-d'oeuvre et les conditions climatiques avant et après la construction.

La durée de service d'un bâtiment est directement fonction du type d'environnement dans lequel le bâtiment se trouve, et des conditions

climatiques qui prévalent lors de la construction. Il importe de bien connaître les caractéristiques des matériaux, leurs utilisations et les effets d'une exposition non voulue au cours de la construction.

La durée de service de l'enveloppe d'un bâtiment est toujours réduite par une mauvaise étanchéité à l'air. Une incompréhension des fonctions individuelles que doit remplir l'enveloppe d'un bâtiment conduit presque toujours à une faible performance du produit final. Dans les prochaines années, les questions les plus importantes sur lesquelles l'industrie de la construction devra se pencher sont la technologie, la conception, la construction et la performance des pare-vent. Ces problèmes devront être résolus rapidement et des solutions efficaces et économiques doivent être trouvées pour améliorer la performance de l'enveloppe du bâtiment et assurer la pérénité des bâtiments.

RÉFÉRENCE

1. GARDEN, G.K. Conception et durée de vie utile, CBD 120F, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, avril 1974.

PERFORMANCE DES FAÇADES DE PIERRE

par

K.N. Burn

AVANT-PROPOS

La présente communication est une version révisée de l'exposé présenté par Ken Burn au cours de Regard 84 sur la science du bâtiment. On dit que la pierre est le symbole de la durabilité et, comme elle connaît à l'heure actuelle un regain de popularité, notamment comme matériau de façade, il semble approprié de rassembler de l'information à ce sujet et de présenter un historique de l'utilisation de la pierre dans les nouveaux bâtiments, ainsi que certains aspects fondamentaux. Le sujet devrait intéresser les concepteurs puisqu'il porte sur les problèmes peu connus liés à l'utilisation de la pierre comme placage.

INTRODUCTION

Il est incontestable que les ouvrages en pierre sont les plus durables. Les archéologues ont découvert, dans le sol de la plaine de Salisbury, les débris organiques d'un alignement de bois sans doute antérieur à l'ensemble mégalithique qui subsiste encore; ce sont pourtant les dolmens et les menhirs de pierre mis en place il y a 3 500 ans qui forment toujours le site connu mondialement sous le nom de Stonehenge (Figure 1).

Figure 1

La construction des pyramides, à peu près à la même époque, faisait partie d'une série de projets plus ambitieux. La technique de la coupe et de la taille des pierres, qui permettait un meilleur ajustement des éléments, fit des progrès considérables grâce à la mise au point d'outils de métal en Égypte.

L'Égypte, puis la Grèce, Rome et l'ensemble de l'empire romain virent s'ériger des temples magnifiques, dont les pierres minutieusement sculptées étaient assemblées avec une grande précision (Figure 2).

Figure 2

Figure 3

Le moyen âge a laissé de grands ouvrages de défense comme les châteaux forts, et des églises dont les flèches s'élevaient jusqu'à 160 m au-dessus du sol (Figure 3). La hauteur n'était pas limitée par le matériau, mais par les techniques de construction et l'état des fondations. La résistance à la compression de la plupart des pierres dépasse largement la charge qui leur est appliquée. Ainsi, l'obélisque de Washington, qui a 170 m de hauteur et des murs de 4,5 m d'épaisseur à la base, produit des contraintes de compression de l'ordre de 4 MPa au niveau des fondations, ce qui correspond à seulement 1/25 de la résistance à la compression de la pierre.

La technique de construction en pierre, qui consistait essentiellement à faire porter les planchers et le toit sur des murs et des colonnes, n'a pas évolué sauf en ce qui concerne le style et la décoration jusqu'à l'avènement, au milieu du dix-neuvième siècle, de bâtiments en acier et en béton armé. Il n'était plus nécessaire de faire des murs massifs à la base; on a alors commencé à construire des murs-rideaux plus légers et plus minces que les murs porteurs, ce qui a permis d'ajouter plusieurs étages au bâtiment sans accroître le poids sur les fondations.

Les premiers gratte-ciel (plus hauts que 15 étages) ont été construits à Chicago et la nouvelle technique a été reprise et perfectionnée à New York, où le sol de fondation, beaucoup plus résistant que celui de Chicago, pouvait recevoir des charges plus lourdes, permettant ainsi d'édifier dans cette ville des immeubles encore plus élevés. Des pierres plus minces paraient les façades de ces bâtiments, mais le détail de l'aspect extérieur changeait très peu. Les blocs de pierre étaient posés les uns sur les autres, et l'ensemble était retenu par des boutisses et des fixations métalliques engagées dans une maçonnerie de remplissage faite d'un matériau moins coûteux et plus léger comme la brique, les blocs d'argile, le béton ou le parpaing. L'essai minutieux des matériaux et l'amélioration des procédés de fabrication ont permis de soumettre l'acier et le béton armé à de plus grandes contraintes. En outre, l'analyse plus précise des ossatures et une meilleure compréhension des charges qui les sollicitent ont mené à la construction de bâtiments encore plus hauts.

Le béton, cette pierre artificielle, avait déjà fait une percée dans l'industrie du bâtiment avant la Deuxième Guerre mondiale. On s'imaginait pouvoir lui donner n'importe quelle forme et fabriquer le matériau à peu près n'importe où. La couleur et le fini de sa surface offraient, croyait-on, une variété infinie.

Il était possible de former l'acier et d'autres métaux en feuilles minces et de les monter avec le verre dans des cadres métalliques pour créer des murs-rideaux légers. La guerre avait permis l'utilisation de matières plastiques et avait donné lieu à un accroissement énorme de la production de l'aluminium et de ses alliages nouveaux et plus résistants.

La pierre, extraite à peu près comme elle l'avait toujours été et dépourvue de la flexibilité des nouveaux matériaux manufacturés, devint relativement chère et après la Deuxième Guerre mondiale, sa part du marché des matériaux de construction diminua de façon constante. Toutefois, l'emploi de la pierre prétaillée persista dans les immeubles de prestige pour revêtir les halls et, sinon toute la façade, du moins le pourtour de l'entrée principale. La pierre paraissait donc vouée à parer les monuments, à être concassée pour la construction routière ou à servir de granulats du béton et du bitume.

La pierre présente cependant deux avantages importants par rapport à la majorité des autres matériaux de construction. Comme le bois, elle n'a pas à être manufacturée et sa grande résistance aux intempéries a déjà été démontrée. De plus, la pierre possède des textures et des couleurs qu'aucun autre matériau ne peut reproduire. Ces caractéristiques très attrayantes et le désir de continuer à employer la pierre dans les bâtiments, même à fort prix, ont conduit à la mise au point de nouvelles techniques de préparation et de construction. La pierre est maintenant débitée en plaques minces utilisées en façade pour parer des panneaux de béton préfabriqués ou pour habiller des ossatures métalliques légères et ce, de multiples façons. Sur le plan économique, ce procédé présente un intérêt particulier : il permet de recouvrir une grande superficie de mur avec une seule pierre de carrière.

FORMATION GÉOLOGIQUE

Il est utile, mais non essentiel aux fins de cette étude, de connaître l'origine et l'évolution géologique de certains types de roches car ces facteurs déterminent dans une large mesure leur résistance, leur porosité, leur ouvrabilité, leur dureté et d'autres caractéristiques physiques et chimiques qui définissent leur comportement comme matériau de construction. De plus, ces facteurs donnent aux roches leur structure, leur texture et leur couleur, c'est-à-dire l'aspect, un critère important de sélection. Les pierres, il va sans dire, proviennent des roches, et il faut faire la distinction entre la roche, qui est le matériau naturel en place dans sa formation géologique et la pierre, qui est le matériau tiré de la roche et utilisé généralement à des fins commerciales. Ces pierres peuvent être petites, arrondies par l'eau pour former du gravier ou broyées mécaniquement pour former des pierres concassées. Coupées en blocs et en plaques minces pour les bâtiments, elles sont souvent appelées "pierres taillées".

TYPES DE ROCHES

Les géologues distinguent trois grands ensembles de roches selon leur origine :

1) Les roches ignées, qui incluent les granites;
2) les roches sédimentaires, comme les calcaires et les grès; et
3) les roches métamorphiques, comme le marbre et l'ardoise.

Les granites se sont formés à la suite du long refroidissement d'une masse fondue, le magma, dans les profondeurs de la croûte terrestre. Ils se caractérisent par une structure cristalline grenue. Les gros grains des minéraux constituants leur confèrent des couleurs et des textures intéressantes. Les granites sont habituellement denses et durs et acquièrent un poli très brillant.

Les roches sédimentaires résultent de l'exposition aux intempéries et de l'érosion des roches préexistantes. Leurs caractéristiques physiques et chimiques varient, parce que le dépôt des particules qui les composent est dû à l'action d'agents naturels différents, mais elles présentent toutes une stratification et contiennent souvent des fossiles. Le grès est fait essentiellement de particules fines ou grosses. Le principal constituant des calcaires est la calcite. Ces roches sont généralement moins denses que les granites et ne sont pas aussi résistantes.

Les roches métamorphiques proviennent de la recristallisation de roches préexistantes à des températures élevées et sous d'énormes pressions provoquées par des mouvements profonds au sein de la croûte terrestre. Les calcaires se sont métamorphosés en marbre et l'ardoise résulte de la transformation du schiste argileux ou de la cendre volcanique. Ces roches sont très denses et dures, et la texture feuilletée bien connue de l'ardoise permet de la débiter assez aisément en fines plaques.

PIERRE DE CARRIÈRE

On exploite les dépôts naturels de diverses roches dans des carrières qui, afin d'être viables sur le plan économique, doivent donner des blocs assez gros pour être utilisés en construction. L'extraction est un art et une science qui font appel à de nombreuses techniques intéressantes (figure 4).

L'exploitation des carrières dépend dans une large mesure du réseau de fissures qui se trouvent dans la plupart des masses rocheuses. Ce réseau se compose en fait d'ensembles de fractures ou de plans faibles qui, sauf pour quelques laves ayant des structures prismatiques hexagonales, sont parallèles et plus ou moins à angle droit les uns par rapport aux autres. Le sens du plan faible, et par conséquent le sens dans lequel la roche se débite le plus facilement s'appelle la faille, le second s'appelle le grain et le troisième, le grain de tête. Si le troisième sens est particulièrement difficile pour le débitage, le terme "éclatement" est employé.

Figure 4

L'existence de ces plans de fissuration dans divers types de roches s'explique de plusieurs façons, mais ils sont dus en général au relâchement des contraintes au cours du refroidissement de la roche ou des mouvements de la croûte rocheuse et aux variations qui se produisent au cours des dépôts ou des métamorphoses. Dans certaines roches, les plans sont bien définis, dans d'autres ils n'existent pas. Un bon carrier reconnaît facilement ces fissures et sait en profiter.

Il existe plusieurs techniques pour débiter les blocs de pierre. Certaines d'entre elles sont employées depuis plusieurs milliers d'années. Citons notamment le forage d'une ligne de trous dans lesquels on introduit une série de coins (languette et cheville) et l'utilisation de "poudre noire" comme solution extrême. Ces méthodes entraînaient parfois le bris des blocs en morceaux trop petits de sorte qu'il y avait toujours du gaspillage, ce qui augmentait les coûts.

Les techniques plus récentes, qui font appel aux scies à câble, aux scies circulaires de grand diamètre ainsi qu'aux lances thermiques, ont nettement réduit les pertes par bris des blocs et celles qui résultaient du débitage sur place dans la carrière avant le transport à l'usine.

Aujourd'hui, des blocs de pierre pesant jusqu'à 50 tonnes sont transportés à l'usine et y sont coupés en petites pierres à l'aide de scies de divers types. Pour découper des plaques minces, les blocs de carrière sont montés sur des chariots et roulent à travers une série de grandes scies à action simultanée découpant jusqu'à 70 plaques de 30 mm d'épaisseur en même temps. Les scies sont généralement des bandes d'acier doux montées dans des cadres horizontaux fixés par deux axes (figure 5). Un arbre relié à un volant donne un mouvement de pendule au cadre et aux lames, de sorte que le bord coupant de la lame est au contact de la pierre à la fin du mouvement de bascule. Alors que le cadre bascule d'une position extrême à l'autre, les lames se lèvent légèrement pour permettre au mélange abrasif, constamment pulvérisé du haut, d'atteindre le fond du sillon, où s'effectue

Figure 5

la coupe. La vitesse de découpage varie selon la dureté de la pierre. Pour la plupart des granites, elle est de 50 mm par heure. Par exemple, il faut environ une journée pour découper des blocs de 1,2 m d'épaisseur. Pour les pierres plus tendres, comme le marbre, la coupe est beaucoup plus rapide. Les plaques sont ensuite retirées du banc de scie et placées sur des convoyeurs à courroie pour être polies par des machines ou finies à la flamme. Ce dernier procédé permet de retirer les minéraux cristallins mis à découvert au cours du sciage, donnant à la plaque un aspect naturel, légèrement rugueux. Après la finition de la surface, les bords de la plaque sont découpés à l'aide de scies à diamants aux dimensions prévues, des trous sont percés et des rainures de fixation sont façonnées selon les besoins.

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DE LA PIERRE

Le choix du matériau de construction approprié repose d'abord (et avant tout) sur les caractéristiques de la pierre, qui seront déterminées au moyen d'essais. En Amérique du Nord, ces essais concernent presque exclusivement les caractéristiques physiques, notamment : densité apparente, porosité, perméabilité, résistance à la compression et à la flexion, résistance à l'abrasion et à l'éclatement par le gel. En Europe, on exige en outre certains essais de dégradation chimique correspondants aux milieux acides créés par les grandes zones industrielles. Les pierres calcaires, largement utilisées, se détériorent sous l'effet de la cristallisation des sels dans leurs pores. Les essais effectués pour déterminer la résistance à ce type d'attaque chimique permettent de classifier les pierres en fonction du degré d'exposition qu'elles peuvent supporter et de définir les usages préférentiels. Dans les bâtiments modernes, seuls les calcaires les plus résistants recouvrent les marches extérieures et constituent le dallage des entrées. Les pierres un peu moins résistantes servent à chaperonner les murs et à construire des cheminées. La troisième et la quatrième catégories, par ordre décroissant de résistance, servent à parer les murs.

BÂTIMENTS DE PIERRE EXISTANTS

Un des problèmes qui se posent actuellement au pays est celui de la réfection des bâtiments historiques, dont le chauffage est très onéreux. Il y a plusieurs facettes à cette question, mais nous nous intéresserons particulièrement à la durabilité des murs de pierre. Si l'on désire préserver l'aspect extérieur, ce qui est souvent le cas, il faut éliminer

d'emblée l'isolation par l'extérieur avec protection de l'isolant par un revêtement léger. Il ne reste donc qu'à isoler par l'intérieur ou dans l'épaisseur des murs si le type de construction le permet. Quelle que soit la solution retenue, la maçonnerie en pierre sera plus froide qu'avant la réfection et il risque d'y avoir une plus forte pénétration du gel. Ceci n'est pas forcément grave. Par contre, la réduction de l'écoulement de chaleur influe sur la migration de l'humidité dans les murs. La pierre et le mortier contiendront donc beaucoup plus d'eau et risquent, surtout le mortier, de se détériorer sous l'effet du gel. Avec un isolant thermique de qualité, l'écoulement de chaleur à travers le mur peut être réduit des trois quarts ou plus, entraînant une diminution équivalente de l'assèchement.

La plupart des pierres résistent bien à l'éclatement par le gel. La résistance dépend en grande partie de la porosité et de la répartition dimensionnelle des pores, mais la résistance en traction du liant naturel est aussi importante et peut varier considérablement. Avec les grès et les calcaires, cette liaison entre particules est parfois assez faible. Il faut étudier chacune de ces caractéristiques et déterminer la gélivité de la roche. Le mortier qui maintient les pierres en place est souvent plus sensible au gel que la pierre, et sa dégradation graduelle possible peut mettre en cause la stabilité du mur. Le remplacement du vieux mortier des joints est une solution efficace, à condition que le nouveau mortier soit compatible avec la maçonnerie en pierre existante. Dans certains cas, on considère qu'il est trop risqué de soumettre le mur à des contraintes environnementales plus sévères et on préfère payer un prix plus élevé pour le chauffage du bâtiment non isolé.

Figure 6

PIERRES DÉPLACÉES PAR L'ACTION DU GEL

De graves désordres se sont manifestés dans les premiers bâtiments dotés de murs-rideaux de pierre, surtout au niveau des pierres de couronnement du parapet et des panneaux de parement des murs. En enlevant les pierres, on a découvert que l'une des causes provenait du gel dans la maçonnerie de remplissage (figure 6). Dans certains cas, les éléments de remplissage, saturés d'eau, s'étaient désagrégés et ne retenaient plus les agrafes de fixation des pierres du parement. Dans d'autres, le gel avait attaqué le mortier qui débordait dans l'espace entre le remplissage et le parement, ce qui provoqua progressivement le déchaussement des pierres. Parfois les agrafes s'étaient corrodées. Dans de nombreux cas, l'humidité indispensable aux dégâts par le gel et la corrosion ne provenait pas des précipitations, mais plutôt de la

condensation dans le mur produite par l'air humide et chaud qui fuyait de l'intérieur. À l'époque où ces bâtiments ont été construits, les projeteurs reconnaissaient à peine le besoin d'une étanchéité à l'air, et la situation s'est détériorée depuis avec la tendance à maintenir une température et une humidité relative plus élevées dans les locaux en hiver.

De minces plaques de pierre, souvent d'ardoise, ont été fixées à la façade des bâtiments contre des maçonneries de remplissage, selon un modèle dérivé de la technique traditionnelle qui consistait à poser les éléments de maçonnerie les uns sur les autres. Les contraintes dues à la gravité sont alors transmises par le bord mince des plaques de pierre au plancher (figure 7*). Les attaches sont souvent des tiges en bronze ou en cuivre souple scellées dans le plâtre de Paris ou autres ciments. Parfois ces ciments subissent l'action du gel lorsque l'eau pénètre dans les joints. Les plaques qui sont déchaussées doivent alors être refixées.

Il arrive que les fixations métalliques transmettent le poids propre des plaques de pierre directement aux murs porteurs en béton coulé ou faits d'autres maçonneries (figure 8*). Ces attaches doivent être plus lourdes et

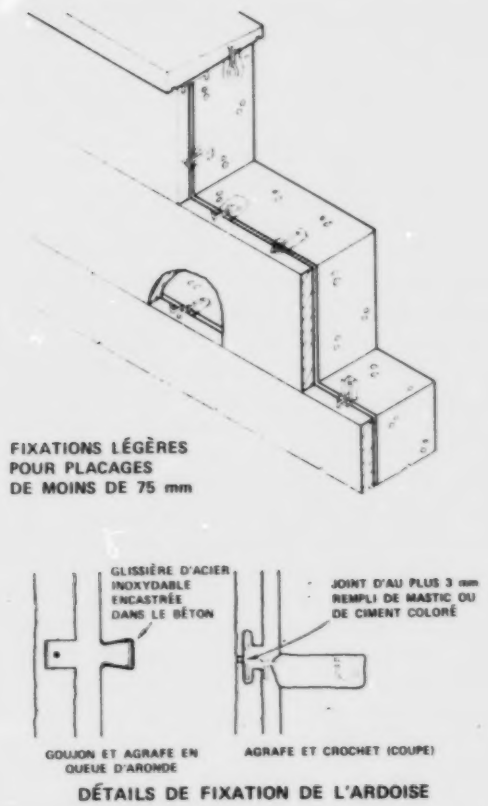


Figure 7

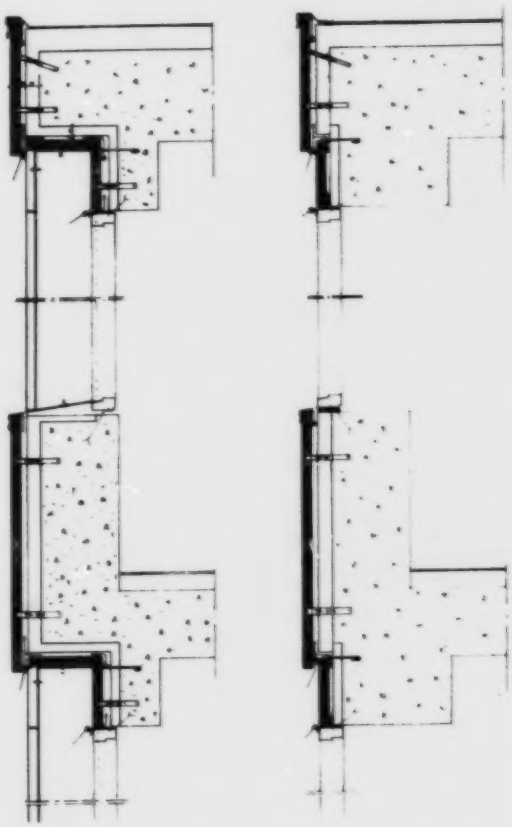


Figure 8

*Tirée de l'ouvrage "Stone in Building" par J. Ashurst et F.G. Dimes, The Architectural Press Ltd., London, 1977.

plus rigides que celles de l'exemple précédent, notamment lorsqu'il y a des couches épaisses d'isolant. Ces attaches plus lourdes doivent également être conçues pour permettre le libre jeu de la pierre sous l'effet des variations thermiques, sans quoi une concentration des contraintes peut briser les minces plaques de pierre.

PAREMENT EN PIERRE SUR DU BÉTON PRÉFABRIQUÉ

Une des méthodes utilisées consiste à revêtir le béton préfabriqué de minces plaques de pierre. Les mortiers de ciment et les résines époxydes, avec ou sans attaches mécaniques, et le coulage du béton directement contre l'arrière des plaques sont tous des moyens qui ont été employés avec un certain succès pour fixer la pierre au béton. Toutefois, il s'est produit des cas où la pierre s'est fissurée ou s'est détachée du support de béton en raison du mouvement différentiel causé par le retrait du béton, les réactions dimensionnelles différentielles de la pierre et du béton face aux changements de température ou par la concentration des contraintes au niveau des attaches mécaniques.

COURBURE DES PLAQUES DE MARBRE

Un problème sérieux relié à l'utilisation de minces parements de pierre a été causé par l'emploi du marbre blanc, le cas le plus connu étant celui du marbre italien de Carrare. Sur plusieurs bâtiments, les panneaux de pierre ont commencé à courber visiblement quelques années seulement après la mise en place. Parfois, comme sur les façades de la salle Finlandia à Helsinki, la déformation des panneaux dans les parties aveugles de l'enveloppe était prononcée. Le marbre blanc a une très forte teneur en calcite pure, alors que les autres marbres contiennent de la dolomite, du carbonate de calcium et du carbonate de magnésium. Les deux minéraux présentent une structure cristalline différente : la calcite (carbonate de calcium) montre des plans de clivage parfaits dans trois directions (la dolomite dans deux seulement). Ceci donne à la calcite un comportement de fluage qui se manifeste même sous de faibles contraintes, de sorte que le matériau se déforme sous la charge. La comparaison des courbes tension-déformation de divers types de roche met cette caractéristique du marbre blanc en évidence, caractéristique que les Romains semblent avoir reconnue. Il est aussi possible d'en observer les effets dans les vieux cimetières où de minces plaques de marbre attachées à une autre pierre se sont affaissées sous leur propre poids (figure 9).

Figure 9

On a vu des panneaux de marbre bomber ou devenir concaves. Certains se courbent selon un axe horizontal, d'autres selon un axe vertical, mais le mode de déformation est habituellement uniforme pour un type de construction

Figure 10

donné parce que les panneaux sont attachés de la même façon. Dans une partie du bâtiment que nous avons étudié (figure 10), la convexité des panneaux n'a été observée que cinq ans après la construction. À un endroit, un panneau de 30 mm d'épaisseur a fléchi de 18 mm, plus de la moitié de son épaisseur, sur une hauteur de 1,6 m. La façon dont la plupart des panneaux sont attachés porte à croire qu'une charge excentrique se concentre aux agrafes ou aux attaches. Si l'explication est juste, alors la situation ne peut que se détériorer avec le temps, à mesure que l'excentricité et la déformation augmentent.

MINCES PLACAGES DE PIERRE

Une autre innovation dans le domaine des minces placages de pierre, qui promet des économies importantes sur les coûts de construction, est l'élément mural préfabriqué dont la partie résistante est en béton. Le panneau comprend l'isolant thermique, la lame d'air et le revêtement de pierre et le tout est fabriqué dans des conditions contrôlées, ce qui permet de prévoir des tolérances moindres.

Les panneaux de pierre sont fixés au mur porteur par divers moyens, mais le plus souvent au moyen d'attaches métalliques suffisamment résistantes pour supporter la charge de cisaillement des pierres sans trop fléchir. Les attaches sont positionnées et fixées à l'arrière des panneaux de pierre dont la disposition dépend de l'ensemble du mur, de la dimension et de l'espacement des fenêtres. Les panneaux muraux sont assemblés à plat dans les coffrages et la première étape de la construction consiste à positionner les panneaux de fenêtre et les panneaux de pierre à la base du coffrage, en prévoyant un espace périphérique uniforme entre eux. Afin de laisser une lame d'air entre le placage de pierre et l'isolant thermique, des cales d'un matériau approprié sont placées à divers endroits sur le panneau de pierre avant qu'il soit recouvert d'isolant. Si le calcul des structures l'exige, les attaches métalliques peuvent être noyées dans le béton et traverser l'isolant thermique par des trous prévus à cet effet (figure 11). Pour éviter les ponts thermiques à ces endroits, des coussins isolants cellulaires de l'épaisseur de la lame d'air sont placés autour des goujons avant de poser l'isolant. Après avoir placé l'isolant et recouvert les joints à l'aide de ruban, l'acier d'armature est mis en place et le béton est coulé.

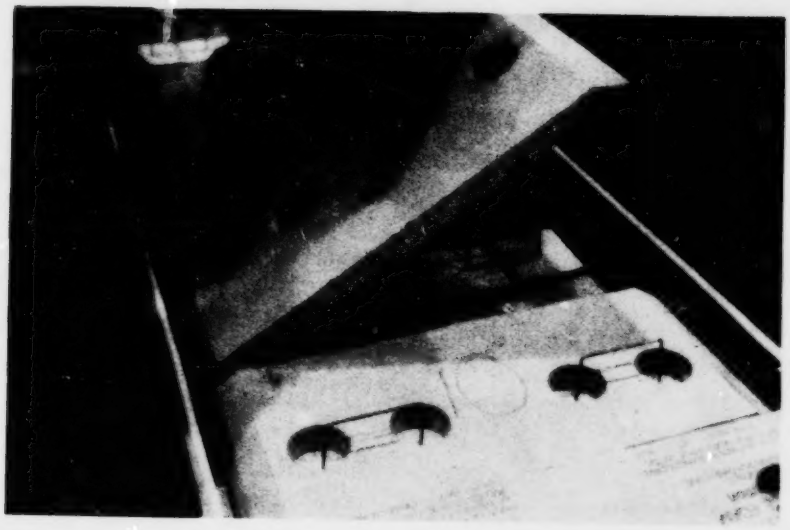


Figure 11

Après la cure, les panneaux finis sont retirés des moules et entreposés. Transportés sur le chantier, ils sont mis en place à l'aide de fixations et l'étanchéité est réalisée aux points de liaison avec l'ossature afin de former un pare-vent. La dernière étape de construction est simplement indiquée, mais pour être efficace elle doit être exécutée avec soin. Les sections de mur sans fenêtre sont revêtues de panneaux de la même pierre mais de plus grandes dimensions, qui sont installés à la main après que les attaches aient été scellées dans le béton coulé sur place et que le mur ait été recouvert d'isolant.

OSSATURES D'ACIER

L'avènement des murs-rideaux à ossature d'acier et parement de pierre a suivi de près l'apparition des murs de béton préfabriqués, amenant avec eux la promesse de charges permanentes encore plus faibles et de constructions toujours plus hautes. Les concepteurs envisagent maintenant avec confiance la construction d'immeubles de 70 à 80 étages de cette façon. Le principal atout est la réduction de poids réalisée grâce au mur-rideau, qui peut aller jusqu'à un tiers ou même un quart du poids de la construction équivalente en éléments de béton préfabriqués. Le principal inconvénient, bien sûr, est le prix élevé de l'acier comparé à celui du béton armé.

Certaines ossatures d'acier ont été conçues simplement pour soutenir le revêtement de pierre, mais d'autres, plus perfectionnées, intègrent le revêtement extérieur et le pare-vent. Un grand nombre de nouvelles constructions consistent essentiellement en séries de panneaux d'allège et de bandes horizontales de vitrage formant chaque étage. Mais l'exemple suivant est celui d'un immeuble où les fenêtres sont "découpées" dans les panneaux préfabriqués. En raison des difficultés de transport, chaque élément mural (d'environ 4 m de haut) a été fabriqué en deux parties : un

panneau d'allège et un panneau de fenêtre (figure 12). Contrairement aux murs de béton préfabriqués, les cadres de fenêtres ont été exclus de la fabrication. Cette condition avait été imposée par les syndicats de la ville où l'immeuble a été construit.

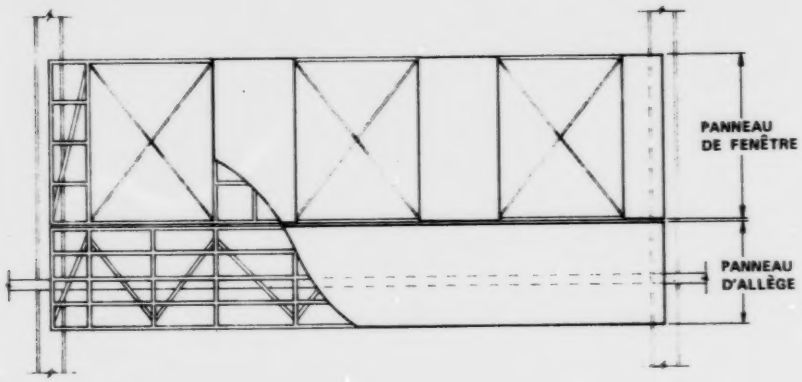


Figure 12

Les panneaux muraux à ossature d'acier sont fabriqués de la même façon que les panneaux muraux en béton, c'est-à-dire à plat avec les éléments structuraux placés sur le revêtement extérieur. La préparation du revêtement nécessite l'insertion de goujons dans des trous obliques percés dans les panneaux de pierre et scellés au moyen de ciment époxy. Les panneaux de pierre sont ensuite alignés sur un support spécial. Des profilés en Z sont attachés avec du PVC, qui crée une coupure thermique entre le métal et la pierre. Ces attaches sont ensuite ajustées avec soin jusqu'à ce qu'elles soient toutes sur le même plan, prêtes à recevoir le treillis d'acier de l'allège. Un isolant en fibre de verre est ensuite étendu sur la pierre.

Les treillis revêtent diverses formes et ils sont insérés dans un cadre préfabriqué de profilés en U ajustés de façon que les bords forment une surface plane (figure 13). Des cornières fixées au treillis supportent les panneaux de pierre et comportent des fentes pour recevoir les attaches. La face du treillis est rendue étanche à l'air par l'application de tôles d'acier galvanisé et par un joint d'étanchéité périphérique maintenu en place par des rivets serrés mécaniquement. Des petits trous dans les tôles permettent le passage des fixations des panneaux de pierre. Les treillis sont ensuite abaissés sur les panneaux de pierre et l'isolant, et les éléments sont assemblés en s'assurant que les points d'attache sont parfaitement étanches à l'air.

Sur le chantier, les éléments sont montés sur une ossature d'acier dont les poteaux sont en retrait par rapport au bord des planchers, ce qui laisse complètement libre l'accès aux joints horizontaux et verticaux entre les sections de treillis d'acier. Les panneaux d'allège sont attachés aux poteaux par des équerres qui supportent à la fois la charge verticale des panneaux d'allège et celle des panneaux de fenêtre. Des fixations réglables sur les poteaux et sur le plancher permettent la mise en place horizontale

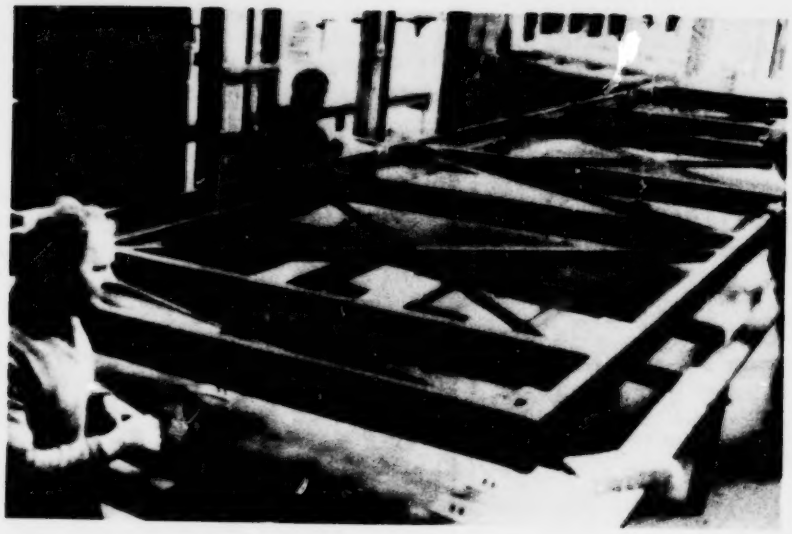


Figure 13

des panneaux et la transmission des poussées du vent et des charges sismiques. Une bande de calfeutrage temporaire en néoprène est placée sur le bord extérieur des sections de treillis et l'ensemble est rendu étanche à l'air en calfeutrant l'intérieur des profilés d'acier en U qui forment le cadre des treillis.

RÉCAPITULATION

Il est utile de revoir brièvement l'évolution des techniques de conception et de construction utilisant la pierre au cours des cent dernières années. La figure 14 est un diagramme très simplifié indiquant les trois grandes étapes d'un long processus qui a connu de nombreuses variations. La figure 14a illustre la conception traditionnelle élaborée dans une région de l'Europe où le climat est beaucoup plus doux que dans la plus grande partie du Canada. Dans les lourdes maçonneries porteuses traditionnelles, la pierre était sollicitée en compression simple, les contraintes étant transmises d'un élément à un autre par des joints secs soigneusement réalisés ou par des joints remplis de mortier. Le poids du toit portait sur les murs de l'étage supérieur. À l'étage inférieur, les murs devaient reprendre la charge du plancher et ainsi de suite. Les contraintes de compression étaient ordinairement très faibles en raison de la grande épaisseur des murs qui était surtout prévue pour résister aux forces latérales du vent et des charges sismiques et assurer la stabilité de la construction. Cette épaisseur était déterminée par l'expérience.

Les conditions atmosphériques d'alors n'étaient pas différentes de celles d'aujourd'hui, mais les murs épais empêchaient habituellement la pénétration de la pluie et du gel. Le stockage thermique dans la masse des murs limitait les fluctuations de température dans les locaux qui n'étaient chauffés que de façon intermittente par le bois ou le charbon brûlé dans les cheminées. L'isolation était pratiquement inconnue et on n'avait pas

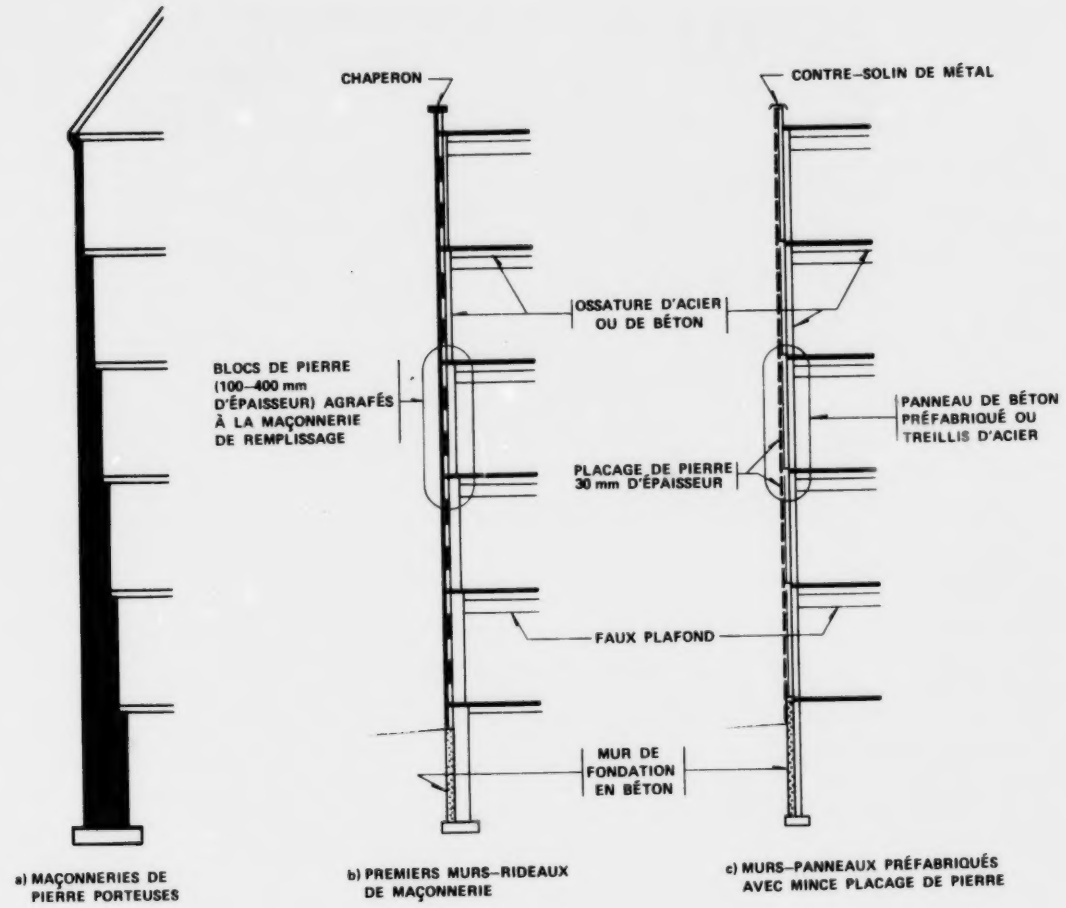


Figure 14

encore songé à régler l'humidité. (Nous avons depuis appris qu'en imposant une ambiance intérieure moderne à ces vieux bâtiments, on risque de causer des dommages importants.)

Les premiers murs-rideaux de maçonnerie, rendus possibles par la construction à ossature, étaient encore assez lourds (figure 14b). La pierre était attachée au mur de remplissage qui reposait sur le bord de la dalle de plancher. La liaison était réalisée par des boutisses ou des briques et des agrafes métalliques. La forme des éléments de pierre avait toutefois changé. Les éléments étaient maintenant plus hauts qu'épais : c'était souvent des plaques lourdes qui exposaient aux intempéries une plus grande surface que les blocs d'antan. Normalement, la superficie réduite des joints aurait dû limiter la pénétration de la pluie, mais cet avantage avait été plus ou moins annulé par la suppression des corniches et des autres saillies qui protégeaient les murs de la pluie. La quantité de pierre employée pour ces façades correspondait peut-être au dixième de celle des murs porteurs.

Des changements considérables se sont produits et l'installation du chauffage central a permis de régler l'ambiance intérieure. Après la Deuxième Guerre mondiale, la nécessité d'isoler afin de réduire la déperdition de chaleur a été perçue, et on a commencé à doubler l'isolant d'un pare-vapeur du côté chaud. Le passage des canalisations, des câbles électriques, des gaines de chauffage, etc., était généralement prévu entre la sous-face de la dalle de plancher et un faux plafond. Le plâtrage à l'arrière des maçonneries procurait une certaine étanchéité à l'air, mais il était interrompu à la hauteur du faux plafond, de sorte que la section du mur extérieur entre le plafond et la dalle de plancher offrait un passage assez facile aux fuites d'air. Un meilleur réglage des conditions ambiantes avait permis d'accroître le taux d'humidité de l'air. Cet air intérieur humide qui fuyait par les régions poreuses des murs, surtout en partie haute du bâtiment, déposait de la vapeur d'eau à l'intérieur des murs de maçonnerie, créant des risques de dommages par le gel et exposant les agrafes métalliques à une corrosion accélérée.

La mise au point d'éléments muraux préfabriqués (figure 14c) a encore réduit la quantité de pierre mise en oeuvre à peut-être un dixième de la quantité employée dans les premiers murs-rideaux. Les minces panneaux, dont le rapport de la longueur à l'épaisseur est parfois aussi élevé que 75 à 1, forment maintenant un revêtement qui n'a plus à résister à la compression (figure 15). En fait, ces panneaux sont délibérément isolés les uns des autres afin qu'ils ne soient pas soumis à des forces de compression lorsqu'ils se dilatent sous l'effet d'une hausse de température ou de l'augmentation de leur teneur en eau. Par contre, les panneaux sont maintenant sollicités en flexion par le vent et les forces sismiques, et c'est précisément là que réside la plus grande faiblesse de la pierre. La résistance en flexion de la pierre correspond normalement au dixième de la résistance en compression, mais elle peut être dans certains cas aussi basse que 1/25 de sa résistance en compression. Il faut donc concevoir les fixations avec grand soin : elles doivent être assez fortes pour soutenir la charge permanente de cisaillement de la pierre et pour transmettre les forces du vent et de l'activité sismique des panneaux à la partie résistante de la construction, mais elles doivent aussi être assez souples pour permettre les variations dimensionnelles engendrées par les changements de température et de teneur en eau sans accroissement sensible de la sollicitation de flexion de la pierre.

La pénétration de la pluie est empêchée ou réduite en obturant à l'aide d'un matériau de calfeutrage tous les joints entre les bords des panneaux de pierre, sauf aux linteaux des fenêtres et au niveau des planchers, où l'eau qui se trouve à l'arrière de la pierre est rejetée à l'extérieur par des solins. (Il est à noter qu'on n'utilise plus de mortier autour des pierres dans ce type de construction.) La séparation des milieux intérieur et extérieur est réalisée par de la tôle ou du béton qui reprend les charges du vent et sert d'étanchéité à l'air, et par une couche d'isolant thermique. L'étanchéité à l'air parfaite de l'ensemble dépend des joints entre les éléments. Lorsque ces joints ne sont pas soigneusement exécutés, il peut y avoir des fuites d'air, l'humidité peut se condenser et le gel et la glace peuvent, en s'attaquant aux fixations, détacher le placage.

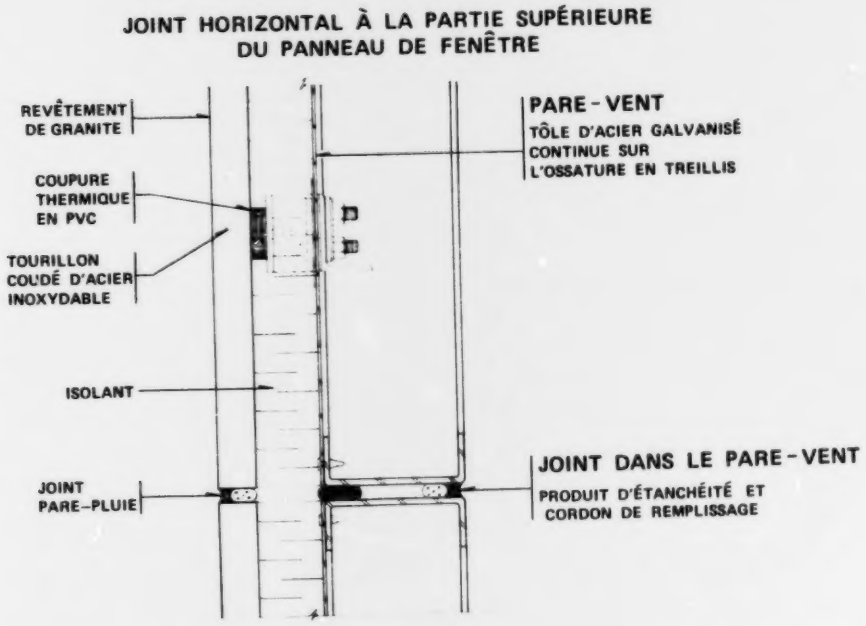


Figure 15

AUTRES LECTURES

Stone in Building, J. Ashurst et F.G. Dimes, The Architectural Press Ltd., London, 1977.

Stone : Properties, Durability in Man's Environment, E.M. Winkler, Springer-Verlag, New York, Vienna, 1973.

Stone Decay and Conservation, Materials Science Monographs, 11, Elsevier, Amsterdam, Lausanne, Oxford, New York, 1983.

Dimension Stone, W.R. Barton, Bureau of Mines Inf. Circ 8391, U.S. Dept. of Interior, 1968.

The Development Potential of Dimension Stone, Dept. of Economic and Social Affairs, Nations Unies, New York, 1976.

Selection of Natural Building Stone, Building Research Establishment Digest 269, Garston, England, janvier 1983.

Stone Veneer Cladding, C.P. Sorensen et E.J. Stephens, Technical Study 46, Dept. of Works, Commonwealth Experimental Building Station, Sydney, 1969.

ENDUITS, ADHÉSIFS ET PRODUITS D'ÉTANCHÉITÉ

par

H.E. Ashton et R.L. Quirouette

INTRODUCTION

Cet exposé porte sur les enduits, les adhésifs et les produits d'étanchéité, sur leurs propriétés, les limites qu'imposent ces propriétés ainsi que les conditions d'application et autres facteurs qui doivent être pris en ligne de compte. Avant d'aborder les divers matériaux, il faut d'abord souligner que la durabilité ne constitue pas une propriété inhérente au matériau de construction, mais qu'elle se définit par rapport à une situation donnée. Un matériau durable dans une région n'est pas nécessairement durable dans une autre région pour la même application, par exemple, en milieu urbain et en milieu rural, dans un climat continental et dans un climat maritime, ou encore dans le nord et dans le sud.

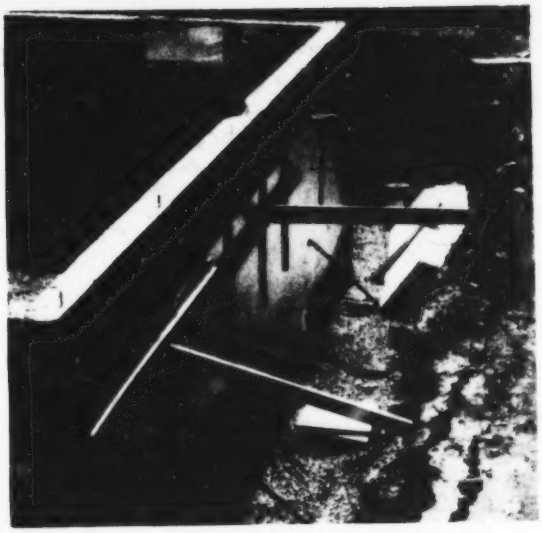
Figure 1

Le concept de durabilité peut également changer avec le matériau. Les gens acceptent volontiers la patine du temps dans le cas des matériaux classiques comme la pierre (figure 1), mais trouvent que les matériaux synthétiques tels que les panneaux métalliques préfinis devraient conserver leur aspect d'origine. Ainsi, la durabilité n'est pas une qualité absolue, car elle varie selon le matériau employé, les conditions d'emploi et même l'attitude de l'utilisateur.

Si un matériau s'est bien comporté sous certaines conditions pendant de nombreuses années, il n'est pas nécessaire d'évaluer sa durabilité puisqu'elle est acquise. La difficulté surgit lorsqu'un matériau connu est employé dans de nouvelles circonstances ou qu'un nouveau matériau est lancé sur le marché pour concurrencer un autre. Il est relativement aisé de reconnaître un nouveau produit ou matériau sur le marché, mais il n'est pas toujours aussi facile de déceler si un matériau est utilisé dans de nouvelles conditions de service, car même un changement important peut ne pas être apparent.

L'enduit de ce mur s'est décollé (figure 2) de son support à cause de l'accumulation d'humidité entre le feuil et le subjectile. Ce défaut est courant car les enduits, même non étanches à la vapeur d'eau, ne peuvent tolérer une grande quantité d'eau à l'interface. Cette situation doit être corrigée pour que le produit puisse se comporter normalement. En fait, la défaillance du revêtement est essentiellement un indice d'une défaillance plus grave à l'intérieur du mur.

Figure 2



L'adhésif appliqué sur le mur de fondation (figure 3) a lâché prématurément et les panneaux d'isolant se sont détachés avant qu'on ait eu le temps de terminer le remplissage. Un examen a révélé qu'il y avait incompatibilité chimique entre l'adhésif et le produit d'étanchéité à base d'asphalte, ce qui a conduit très rapidement à la chute de l'isolant. Un mauvais choix de produit d'étanchéité ou d'adhésif est la cause de cette défaillance qui aurait pu être évitée avec un adhésif moins cher, chimiquement compatible avec le produit d'étanchéité de la fondation.

Figure 3

Figure 4

Le produit d'étanchéité appliqué au pourtour de cette fenêtre s'est fendu le long du meneau (figure 4). L'examen de ce "défaut de cohésion" a montré qu'un schème complexe de déformation thermique a poussé la partie centrale du meneau sur la vitre, forçant le matériau d'étanchéité à s'étirer au-delà de sa capacité. La cause de la défaillance a été attribuée à la dilatation du cadre métallique de la fenêtre qui, combinée à la technique de fixation du châssis, a entraîné un trop grand mouvement latéral du meneau. Ainsi, la véritable source du problème réside dans la mauvaise évaluation des mouvements thermiques à la surface du bâtiment.

L'analyse des défaillances indique souvent que les propriétés du matériau ne conviennent pas à l'environnement immédiat ou aux charges appliquées. Les conditions d'emploi sont souvent mal évaluées ou les propriétés du matériau n'ont pas été considérées avec soin, ou les deux.

ENDUITS

L'enduit est un mélange liquide ou liquéfiable qui, appliqué en minces couches sur un support, forme une pellicule adhérente en séchant. L'enduit sert à décorer et à protéger. Il est surtout employé pour modifier la couleur, le brillant et le fini, lisse ou rugueux, de la surface qu'il recouvre. Si les exigences de protection sont importantes, elles ne sont pas universelles. Les métaux ferreux doivent être protégés de la rouille qui, en plus d'être inesthétique, affaiblit le matériau (figure 5). Par contre, le bois est revêtu pour des considérations esthétiques uniquement, car le bois non protégé peut se comporter comme prévu dans la plupart des bâtiments canadiens. Les constructions en bois ont survécu plus d'un siècle sans que l'on ait eu recours à la peinture. Toutefois, les plastiques se situent à mi-chemin : certains doivent être protégés des rayons ultraviolets pour garder intacte leur intégrité

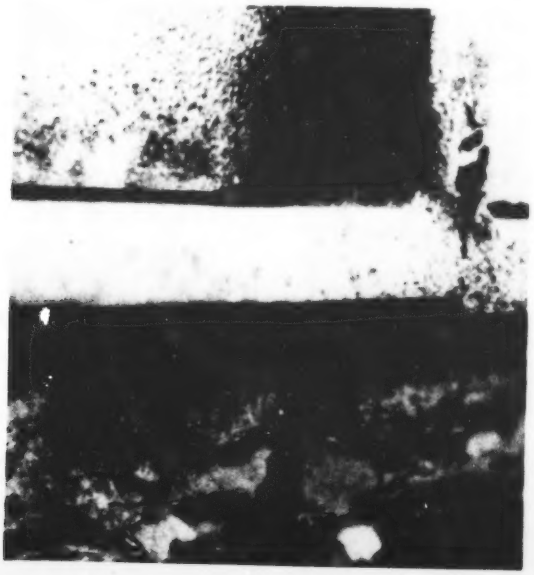


Figure 5

structurale, d'autres sont enduits pour conserver leur apparence. D'autres encore n'ont besoin d'aucun revêtement. Quant aux maçonneries, la plupart sont enduites afin d'améliorer leur aspect visuel ou d'empêcher les intempéries de les altérer.

Critères de conception

La conception d'un bâtiment a une influence directe sur la performance des enduits et l'entretien du bâtiment. Ceci est particulièrement évident lorsque deux métaux différents sont en contact, provoquant une corrosion galvanique et la rupture du revêtement. Dans certains cas, les poutres et les poteaux qui, à l'origine étaient placés à l'intérieur des bâtiments, sont aujourd'hui placés à l'extérieur. Il est possible que des enduits autrefois satisfaisants, notamment l'apprêt pour l'acier, puissent ne pas être en mesure de résister à de longues expositions aux intempéries.

Figure 6

Dans le cas des membranes de toiture, la plupart des enduits ont une meilleure tenue en service s'ils sont appliqués sur des surfaces horizontales ayant une pente suffisante pour l'écoulement de l'eau. Cet écoulement (figure 6) peut également abîmer les enduits recouvrant la maçonnerie, les isolants en mousse ou les composants métalliques. Le profilé métallique en U renversé de cette fenêtre (figure 7) nécessitera des travaux d'entretien dans peu de temps. La situation est encore pire lorsque les profilés en U sont dissimulés ou inaccessibles.

Figure 7

CRITÈRES DE SÉLECTION

Le choix d'un enduit résulte habituellement d'un compromis, car il est impossible de trouver réunies dans un seul produit toutes les propriétés recherchées. Pour qu'un enduit soit durable, il doit bien adhérer au support. Pour la plupart des produits à base de solvants qui sèchent à l'air, les groupes moléculaires qui favorisent l'adhérence sont les plus sensibles aux attaques chimiques. Comme on le voit dans le tableau 1, les peintures à l'huile ont une excellente adhérence mais une faible résistance à l'eau. Par contre, les feuils vinyliques, qui ont une grande résistance aux attaques chimiques, adhèrent mal au support et sont très dépendants de l'état de surface. En général, plus l'enduit est résistant, meilleure doit être la préparation de la surface. Les résines époxydes semblent être une exception car elles ont une excellente adhérence, mais elles exigent une préparation plus soignée du métal étant donné qu'elles sont surtout utilisées lorsque les conditions sont extrêmement sévères.

On peut voir au tableau 1 d'autres limites imposées par les propriétés : les peintures à l'huile ne sont pas utilisées à l'intérieur parce qu'elles sèchent lentement et qu'elles jaunissent, ni dans les milieux marins ou corrosifs parce qu'elles résistent mal à l'eau et aux agents chimiques. Les peintures à base de résines alkydes (parfois appelées à tort peintures à l'huile) sont utilisées à l'intérieur. Parce qu'elles présentent une moins bonne résistance aux alcalis que les peintures au latex, les peintures à base de résines alkydes et les peintures à l'huile ne sont pas utilisées pour les maçonneries. Les résines époxydes et les uréthanes tout usage sont à éviter à l'extérieur à moins que leur grande résistance chimique ne soit requise, car elles jaunissent et farinent. Les résines époxydes sont utilisées comme apprêt métallique extérieur car une fois recouvertes d'un autre revêtement, elles ne jaunissent pas et ne farinent pas.

Enfin, il faut mentionner une autre limite qui n'est pas indiquée au tableau et qui concerne les revêtements transparents sur bois. S'il est vrai que les résines alkydes et les uréthanes ainsi que les laques acryliques et cellulosiques forment de bons revêtements transparents sur métal, ils transmettent trop de rayons ultraviolets, surtout les vernis acryliques. La surface du bois se dégrade et le revêtement pèle parce que sa résistance cohésive est beaucoup plus grande que celle des fibres cellulosiques du bois.

Il n'y a pas que les propriétés du liant à considérer dans le choix du type d'enduit. Souvent, les limites qu'imposent certaines options sont ignorées. Par exemple, si l'aspect du revêtement est privilégié par rapport à la protection offerte ou l'inverse, la fonction négligée risque d'en être affectée. C'est le cas lorsque la protection du subjectile est jugée essentielle. L'augmentation de la proportion de liant donne habituellement une meilleure protection. En effet, c'est la résine qui assure l'adhérence et la résistance à l'eau et aux gaz. Toutefois, un enduit plus riche en résine est aussi très brillant et fait ressortir les imperfections de surface, ce qui n'est pas toujours acceptable. Par contre, si l'on choisit un enduit mat pour son apparence, il risque de se salir plus facilement et peut être plus difficile à laver qu'un fini brillant en raison de sa rugosité microscopique.

TABLEAU 1 Comparaison des liants d'enduits

	Huile	Vernis phénolique	Alkyde	Latex	Laque acrylique	Époxy	GP uréthane	Vinyle
Caractéristiques								
Rétention du lustre	F	TB	E	E	E	F	M	TB
Jaunissement	Cons	Cons	L	N	N	Cons	Cons	L
Adhérence	E	B	B	B	B	E	B	M
Dureté	F	TB	B	M	TB	E	E	B
Flexibilité	M	F	B	E	M	B	E	E
Perméabilité à l'eau	Mod	Faible	Mod	Élevée	Faible	Faible	Faible	Faible
Résistance :								
à l'abrasion	F	B	M	M	B	E	E	E
à l'eau	M	E	B	B	B	E	E	E
aux détergents	M	E	AB	AB	B	E	E	E
aux acides	F	E	M	B	B	E	E	E
aux alcalis	F	B	M	B	B	E	E	E
à la chaleur	M	B	B	M	M	B	B	F
aux solvants puissants	M	B	M	F	F	E	E	F
Utilisation								
À utiliser sur :								
le bois (pigmenté)	B	E	E	E	NR	TB	E	NR
le béton frais	NR	NR	NR	E	E	E	B	E
le métal (pigmenté)	B	E	E	TB	E	E(*)	M	E
le métal (décapé)	NR	E	E	NR	E	NR	E	NR
Préparation des surfaces pour le métal	1	3	2	2	4	3	4	4
Service :								
intérieur	NR	TB	E	E	M	E	E	NR
extérieur normal	B	E	E	E	E	E(*)	M	E
milieu marin	F	B	B	M	B	E(*)	E	E
milieu corrosif	NR	B	M	NR	B	E	E	E

E = Excellent
TB = Très bon
B = Bon
AB = Assez bon
M = Moyen
F = Faible
NR = Non recommandé

N = Nul
L = Léger
Mod = Modéré
Cons = Considérable
UG = Utilisation générale
* = Apprêt

Préparation de la surface
1 = Très facile
4 = Très difficile

Une finition texturée de couleur claire peut faire ressortir la saleté accumulée dans les creux, alors que les saillies seront lavées par la pluie. Le choix portant essentiellement sur l'aspect peut nuire à la performance dans certains bâtiments où, par exemple, il a été décidé de décorer la façade en acier inoxydable de bandes noires mattes. Malheureusement, il est très difficile de traiter l'acier inoxydable pour que des enduits organiques y adhèrent bien, un fait trop souvent ignoré des carrossiers d'automobile. En conséquence, les bandes noires ont commencé à s'écailler quelques années seulement après la construction des bâtiments.

Conditions d'application

Après avoir choisi l'enduit, il faut préciser comment il doit être appliqué. Ceci est très important ne serait-ce qu'en raison des coûts d'application, qui comprennent la préparation de la surface et qui sont habituellement de 3 à 5 fois plus élevés que le prix des produits. Plus important encore est le fait qu'une mauvaise peinture appliquée sur un support bien préparé donnera sans aucun doute de meilleurs résultats qu'une peinture de qualité supérieure appliquée sur une surface mal préparée. Ceci confirme que la durabilité n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux. La série de normes ONGC 85-GP, publiée par l'Office des normes générales du Canada, définit l'état des surfaces à peindre et les conditions ambiantes souhaitables pour l'application des peintures. La norme CAN 85.100-M81 (Norme nationale du Canada) donne des recommandations sur tous les aspects des travaux de peinture, y compris sur la façon d'établir un cahier des charges. Comme la préparation des surfaces et le milieu ambiant ont une grande influence sur la durabilité des revêtements, la plupart des matériaux se peignent plus facilement en usine, où les conditions ambiantes au moment de l'application peuvent être soigneusement surveillées. Si les opérations de peinture en usine ne sont pas surveillées, alors les précautions prises lors du transport et de la pose ne seront pas justifiées. Souvent, la peinture en usine requiert une couche d'apprêt à séchage très rapide qui nécessite une préparation de surface encore plus soignée, laquelle n'est pas toujours fournie.

ADHÉSIFS

L'adhésif est une matière capable de fixer superficiellement des matériaux entre eux, c'est-à-dire sans les pénétrer. Ainsi, une vis n'est pas un adhésif. Le terme englobe les produits vaguement désignés sous le nom de colles. Cette imprécision terminologique découle de l'absence d'un ensemble de techniques propres aux adhésifs, la distinction s'établissant souvent en fonction du genre de matériaux joints. Les adhésifs sont tour à tour qualifiés selon leur état physique (adhésif liquide), leur formulation (adhésif époxyde), les matériaux qu'ils joignent (adhésif pour papier) ou leurs conditions d'application (adhésif à chaud). L'adhésif doit recouvrir toute la surface pour être efficace. S'il pénètre les matériaux à joindre, il risque d'y avoir une mauvaise adhérence. Ceci se produit parfois avec le contreplaqué lorsqu'un manque de colle au niveau d'un joint entraîne une perte d'adhérence entre les placages.

Les adhésifs ne sont pas des produits d'étanchéité appliqués en minces couches. Ils ne font que maintenir ensemble des éléments tandis que les

produits d'étanchéité scellent les ouvertures entre les différents éléments de l'enveloppe des bâtiments. On ne s'attend pas à ce que les adhésifs aient une flexibilité telle que deux éléments puissent se déplacer indépendamment l'un de l'autre, alors que la flexibilité est la plus importante caractéristique des produits d'étanchéité. Par conséquent, il n'est pas surprenant qu'il y ait des défaillances lorsqu'on utilise un adhésif comme produit d'étanchéité, comme adhésif et produit d'étanchéité ou encore pour une troisième fonction. Comme principal exemple, citons l'usage d'une épaisse couche d'adhésif (figure 8) qui devrait théoriquement servir de pare-vapeur, de pare-vent, et de produit d'étanchéité. Est-ce qu'un seul matériau peut remplir toutes ces fonctions? En principe, s'il s'agit d'un mastic, on peut s'attendre à ce qu'il remplisse ces trois fonctions.

Figure 8

Le mastic est un matériau visqueux qui peut être appliqué en une couche relativement épaisse. Le mot mastic provient du grec mastikhê, qui est une résine épaisse exsudée par un arbuste appelé lentisque. Les propriétés d'un mastic et l'usage auquel il est destiné dépendent toutefois de sa composition. Pour éviter les erreurs, le nom du mastic devrait rappeler son type générique et son utilisation principale, comme dans la norme ONGC 37-GP-65M "Mastic d'asphalte (procédé à chaud) pour revêtements de sols" et la norme 37-GP-67M "Mastic d'asphalte (procédé à chaud) pour revêtements de toitures".

Avant de choisir un adhésif (ou un mastic), l'utilisateur devrait consulter les documents du fabricant et vérifier si les propriétés du matériau sont telles qu'il se comportera comme prévu.

PRODUITS D'ÉTANCHÉITÉ

Un produit d'étanchéité est un matériau placé dans un joint ou une ouverture où il y a risque de mouvement, et destiné à empêcher le passage des gaz (air), des liquides (eau) et des solides (poussières ou saletés). Il sert donc essentiellement à fermer l'espace entre deux matériaux différents ou de même nature. Comme les joints s'ouvrent et se ferment en fonction de la température ou d'autres forces, les produits d'étanchéité

doivent rester élastiques après le séchage. Ceux-ci sèchent par évaporation du solvant ou par réaction chimique.

Un matériau de calfeutrage est un produit d'étanchéité à base de pétrole qui a une assez faible tolérance au mouvement, c'est-à-dire dont le jeu maximal est habituellement inférieur à 5 %. Les produits d'étanchéité de qualités moyenne et excellente sont généralement à base de polymères.

Types de produits d'étanchéité

La variété des produits de calfeutrage et d'étanchéité semble presque infinie. Les produits peuvent être classifiés selon leur évolution historique, leur composition chimique ou leurs applications. La performance d'un produit d'étanchéité dépend de son exposition aux températures, au rayonnement ultraviolet, au vent, à la pluie et aux polluants atmosphériques. Il dépend beaucoup aussi de la conception des joints qu'il doit remplir. Toutefois, le facteur affectant le plus la durabilité du produit demeure sa résistance au mouvement.

Comme le critère d'élasticité est très important, le tableau 2 présente une série de produits d'étanchéité allant des mastics aux polysulfides, uréthanes et silicones, regroupés par catégorie selon leur degré d'élasticité. Cette classification provient d'un article du rédacteur principal de la revue "Plant Engineering" de janvier 1976[1].

Propriétés des produits d'étanchéité

Les propriétés qui interviennent dans le choix d'un produit d'étanchéité sont : l'adhérence, la cohésion, la dureté, le module d'élasticité, la déformation rémanente après compression et la résistance aux intempéries. Après l'aspect élasticité, l'adhérence est le critère de choix le plus important. Toutefois, bien qu'un produit d'étanchéité doive adhérer aux parois d'un joint et résister aux forces de rupture internes imposées par les variations dimensionnelles du joint, il importe peu qu'il adhère convenablement s'il ne peut résister à ces forces. Le module d'élasticité est une mesure des propriétés élastiques d'un produit et s'exprime par le rapport de la contrainte à la déformation.

Les produits d'étanchéité doivent être formulés de façon à résister aux forces engendrées par les fortes températures, c'est-à-dire le ramollissement du produit et la dilatation thermique des éléments du joint, qui peuvent entraîner l'écoulement du produit. Ils doivent avoir certaines des caractéristiques du caoutchouc, qui s'obtiennent plus facilement par traitement chimique que par simple évaporation d'un solvant. La déformation rémanente après compression exprime la propension du produit à rester comprimé une fois la charge appliquée.

Critères de conception

Comme les produits d'étanchéité servent généralement à obturer les vides et les ouvertures, il faut avant tout savoir si le joint à boucher est mobile ou fixe (figure 9). Un joint fixe est un joint dont la largeur varie de 5 % ou moins.

TABLEAU 2 Résumé des propriétés des produits d'étanchéité (modifié par rapport à la référence 1)

Type de produit d'étanchéité	Performance faible		Performance moyenne		Performance élevée				
	À base d'huile monocomposant	Latex (acrylique) monocomposant	Butyle monocomposant	Acrylique (à base de solvant) monocomposant	Polysulfide monocomposant	Polysulfide bicomposant	Uréthane monocomposant	Uréthane bicomposant	Silicone monocomposant
Jeu, en pourcentage	±3	±5	±7,5 à ±10	±7,5 à ±12,5	±20	±25	±25	±25	±25 (±40)**
Largeur maximum du joint, en mm	12 à 18	12 à 18	12 à 18	18	12 à 25	18	12 à 36	50	30
Durée de service, en années	2 à 5	3 à 7	5 à 10	5 à 20	10 à 20	10 à 20	10 à 20	10 à 20	10 à 20
Gamme de températures en service, en °C	-18 à 66	-17 à 71	-29 à 82	-29 à 82	-40 à 82	-40 à 82	-40 à 82	-40 à 82	-54 à 177
Gamme de températures recommandées pour l'application (certains peuvent nécessiter de la chaleur à basse température), en °C	4 à 49	4 à 49	4 à 49	-18*** à 49	4 à 49	4 à 49	4 à 49	4 à 49	-29 à 71
Temps de cure* jusqu'à perte de viscosité, en heures	6 à 12	0,5 à 1	24	12 à 36	12 à 24	24 à 48	12 à 48	24 à 48	0,25 à 1
Temps de cure* pour une performance recherchée, en jours	permanent	5	permanent	14	30 à 45	7	8 à 14	3 à 5	5 à 14
Rétrécissement, en pourcentage	5	20	20	12 à 15	8 à 12	0 à 10	0 à 5	0 à 5	0 à 5
Dureté initiale (1 à 6 mois), échelle A indiquée à 24 °C		15 à 40	10 à 40	25 à 50	20 à 45	20 à 45	20 à 45	20 à 45	15 à 45
Dureté (5 ans), échelle A indiquée à 24 °C		30 à 50	30 à 50	30 à 60	25 à 55	20 à 55	20 à 55	20 à 55	15 à 45
Extensibilité à basse température	très faible	faible	faible à moyenne	faible à moyenne	faible à forte	moyenne à forte	faible à forte	moyenne à forte	forte
Couche d'apprêt requise pour l'adhérence :									
à la maçonnerie	non	non	non	non	oui	oui	non	possible	possible
au métal	non	non	non	non	possible	possible	non	possible	possible
au verre	non	non	non	non	possible	possible	non	possible	non
Solvant de nettoyage avant le séchage (essayer un nettoyage à sec d'abord)	essences minérales	eau savonneuse	essences minérales	xylol, toluol	xylol, toluol	xylol, toluol	xylol, toluol	xylol, toluol	xylol, toluol MEK
Normes ONGC pertinentes	19-GP-6	19-GP-17	19-GP-14	19-GP-5	19-GP-13	19-GP-24	19-GP-13	19-GP-24	19-GP-13

*Affecté par la température et l'humidité
**Faibles valeurs du module entre parenthèses; certains produits d'étanchéité peuvent avoir une élasticité plus grande que celle indiquée
***Pour les applications sous 10 °C, le produit d'étanchéité est généralement chauffé, autrement (4-49)

Remarque : Il est recommandé que le jeu du joint ne soit pas supérieur à 25 %.

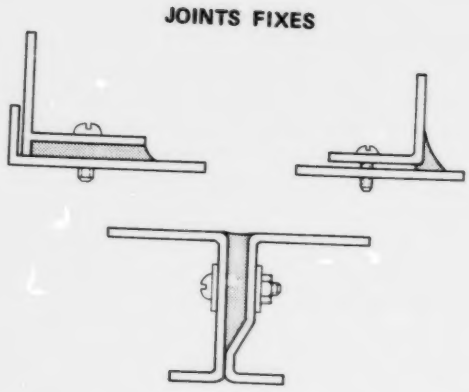


Figure 9

Ensuite, il s'agit de déterminer la fonction du produit : est-il destiné à empêcher la pénétration de la pluie, à affaiblir la transmission du son, à agir comme étanchéité à l'eau et à la vapeur ou à s'opposer au passage de l'air lorsque le joint fait partie d'un pare-vent? Cette dernière fonction, d'un intérêt particulier, pose un problème complexe à résoudre car les connaissances dans ce domaine sont limitées.

Le troisième critère consiste à déterminer si le joint sera exposé aux éléments ou s'il sera dissimulé à l'intérieur d'un mur, d'un toit ou d'une fenêtre. Généralement, les joints donnant sur l'extérieur seront appelés à travailler beaucoup; ils doivent donc être conçus pour résister aux intempéries, ce qui, de toute évidence, n'a pas été le cas pour la pièce d'appui de la fenêtre illustrée à la figure 10.

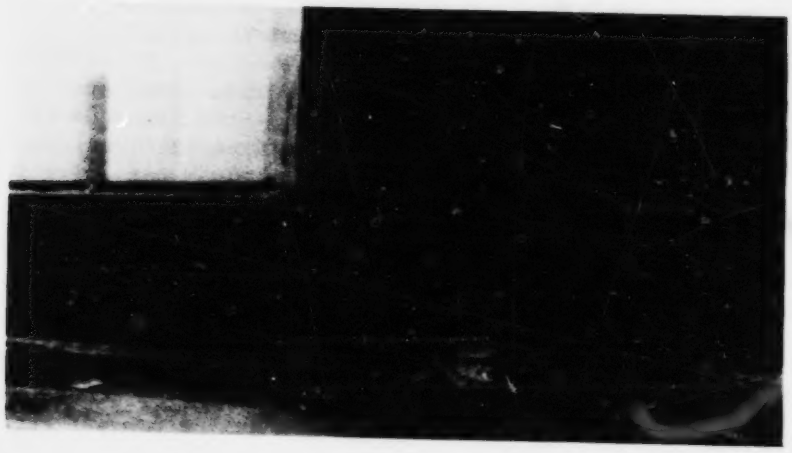


Figure 10

Le quatrième critère est la configuration du joint ou de l'ouverture à étancher. Le joint idéal (figure 11) mesure de 10 à 20 mm de large et a des bords nets et parallèles qui s'étendent vers l'intérieur jusqu'à une profondeur suffisante pour permettre l'insertion au fond du joint d'un support anti-adhérent. Dans la pratique, cette forme est peu fréquente.

Il existe de nombreuses autres configurations, comme par exemple (figure 12) le joint bout à bout, le joint à recouvrement, le joint à emboîtement, etc. Idéalement, les joints devraient être spécialement conçus, mais dans le processus de construction actuel, les joints entre les éléments sont généralement étudiés après que tous les éléments aient été

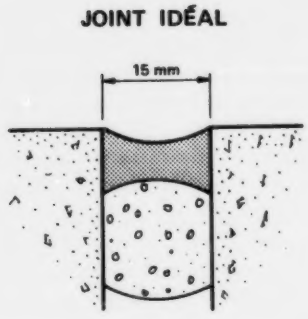


Figure 11

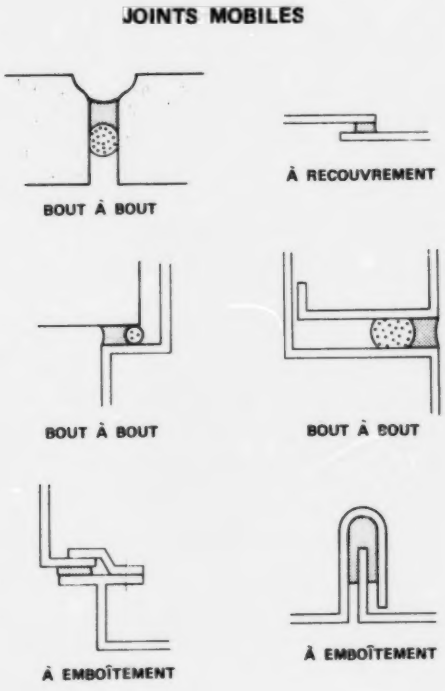


Figure 12

fabriqués, mis en place et alignés. Toutefois, une plus grande attention devrait être accordée à la configuration des joints au moment de calculer les façades, les vides et les ouvertures aménagées en prévision des mouvements de la construction, les joints de dilatation et les tolérances des cadres de fenêtres et de portes, etc. La conception des joints est un sujet en soi qui ne sera pas traité davantage dans ce texte.

Exigences au moment de l'application

Un des facteurs les plus importants à considérer au moment de l'application d'un produit d'étanchéité est le type de subjectile : verre, métal, béton, pierre, plastique ou bois. Chacun des matériaux présente des caractéristiques et des exigences particulières, comme les produits d'étanchéité eux-mêmes. Certains exigent une couche d'apprêt, d'autres non. En règle générale, on recommande que les subjectiles soient propres et secs, exempts d'huile, de graisse et de poussière et qu'ils soient à une température convenable. Dans la pratique, la pose du produit d'étanchéité se fait parfois au cours de l'hiver, en plein été, sous la pluie ou par forte humidité, ou lorsqu'il y a de la poussière, c'est-à-dire dans des circonstances défavorables à son application. Il est donc important de prévoir les conditions d'application et de faire la distinction entre celles qui peuvent être contrôlées et les autres. S'il existe un grand nombre de conditions qui ne peuvent être modifiées, il faudra choisir un produit d'étanchéité moins sensible aux conditions d'application médiocres, même s'il ne présente pas les meilleures caractéristiques. La situation est semblable à celle qui se produit avec les enduits, lorsqu'une couche d'apprêt de moins bonne qualité doit être employée parce que la préparation de la surface n'a pu être effectuée convenablement.

RÉSUMÉ ET CONCLUSION

La durabilité n'est pas une caractéristique inhérente aux produits mais dépend des conditions d'application et d'utilisation. Ce fait complique évidemment le processus de sélection. La meilleure recommandation serait peut-être d'opter pour une approche logique qui permettrait d'optimiser la durabilité, c'est-à-dire la tenue en service des produits, notamment pour les nouvelles applications d'un produit existant ou pour le remplacement d'un produit traditionnel par un produit nouveau.

La démarche serait généralement la suivante : premièrement, obtenir une liste des enduits, des adhésifs ou des produits d'étanchéité et rassembler autant de renseignements techniques que possible sur chaque produit. Les fiches techniques des fabricants constituent habituellement la meilleure source d'information, bien que d'excellents résumés des propriétés des matériaux aient été publiés par des sources indépendantes. Une autre méthode de sélection consisterait à déterminer s'il existe certaines spécifications du produit qui correspondent parfaitement aux exigences techniques. Au Canada, cette vérification est aisée puisque la plupart des fabricants de produits d'étanchéité indiquent sur l'étiquette si leurs produits satisfont à certaines spécifications. Malheureusement, les fabricants de peinture ne veulent pas encore fournir cette information à l'utilisateur. Il existe toutefois des listes de produits certifiés au Canada (LPC) (enduits et produits d'étanchéité). Ces listes peuvent être obtenues de l'ONGC et contiennent les noms des produits qui sont conformes à une spécification donnée. Deuxièmement, et par ordre inverse d'importance, il faut déterminer les critères de tenue en service recherchés (c'est-à-dire, s'il faut empêcher la corrosion, utiliser un adhésif, ou obtenir un pare-vapeur ou une étanchéité à l'air, etc.) et utiliser ces caractéristiques pour effectuer une première sélection des produits qui satisfont aux exigences de l'équipe de conception. Troisièmement, il faut considérer les caractéristiques d'application, y compris la compatibilité avec le subjectile, la difficulté d'exécution, le matériel nécessaire à l'application, les autres intervenants et le milieu ambiant au moment de la pose, et comparer ces données avec les caractéristiques des matériaux retenus à l'étape précédente. Un entretien avec le constructeur ou un sous-traitant permettra de recueillir une grande partie des renseignements nécessaires à cette étape. Le choix sera alors restreint à un petit nombre de produits les plus appropriés pour l'emploi envisagé. Enfin, il faut examiner le coût, la disponibilité, la performance et l'entretien pour être en mesure de dresser la liste des produits propres à faire l'objet d'une demande de soumission et surtout capables d'offrir le rendement recherché par les constructeurs et surtout les propriétaires.

RÉFÉRENCE

1. R. Baldwin, Selecting High Performance Building Sealants, Plant Engineering, Janvier 1976, p. 58-64.

LA DÉTÉRIORATION DES GARAGES DE STATIONNEMENT

par

G.G. Litvan

INTRODUCTION

La principale et dans la plupart des cas la seule cause de la détérioration rapide des garages de stationnement est la corrosion des aciers d'armature (figure 1) enrobés dans le béton. L'action du gel pose rarement un problème car la température, même dans les garages non chauffés, est rarement inférieure au point de congélation. Cette communication traite donc essentiellement de la corrosion de l'acier d'armature dans les garages, notamment ceux à dalles suspendues.

Figure 1

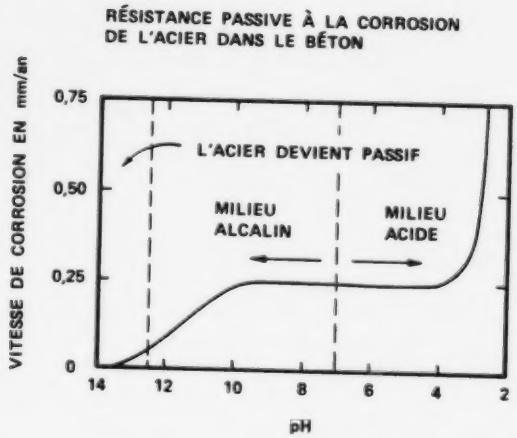


Figure 2 (tirée de la référence 1)

Comme le montre la figure 2, la corrosion de l'acier dépend de l'alcalinité du milieu ambiant. Lorsque le pH est élevé, la tendance de l'acier à se corroder est négligeable; l'acier est "passif". Le béton durci contient de grandes quantités de chaux qui le rendent fortement alcalin (pH compris entre 12 et 13). Normalement, l'acier ainsi enrobé ne rouille pas. Si toutefois la chaux du béton est lessivée ou neutralisée par la carbonatation (la transformation de la chaux en carbonate de calcium par réaction avec le dioxyde de carbone), il y a destruction de la passivité de l'acier et la corrosion se produit.

La corrosion de l'acier se produit même dans des milieux fortement alcalins en présence d'ions de chlorure. Le mécanisme par lequel les ions de chlorure favorisent la corrosion et détruisent la passivité de l'acier

n'est toujours pas entièrement compris. On sait toutefois que les chlorures ne disparaissent pas pendant la réaction; ils agissent comme catalyseurs et, une fois amorcé, leur effet nuisible se poursuit.

Malheureusement, les sels de dégivrage utilisés sur les routes (le chlorure de sodium et le chlorure de calcium) contiennent des ions de chlorure. Ces produits chimiques se mélangent à la neige et à la glace et sont introduits dans les garages par les automobiles. Lorsque la neige et la glace fondent, les ions s'infiltrent dans le béton pour atteindre très rapidement l'acier d'armature. La corrosion est proportionnelle à la concentration d'ions de chlorure. Une fois la corrosion commencée, des fissures causées par l'accumulation d'un grand volume de produits de la corrosion apparaissent dans le béton. Cette accumulation entraîne éventuellement l'éclatement du béton et l'exposition des armatures d'acier, phénomène illustré à la figure 3.

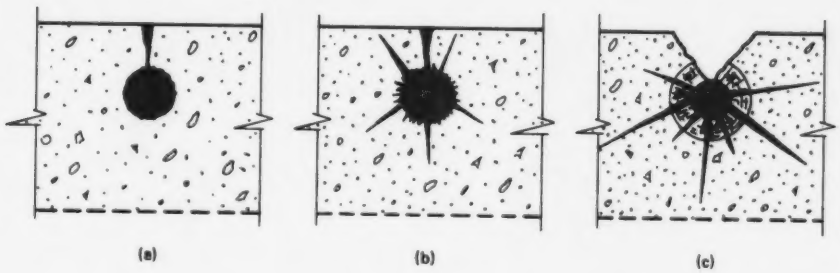


Figure 3

LE MÉCANISME DE LA CORROSION

La corrosion est un phénomène électrochimique facile à décrire à l'aide d'une simple pile galvanique, illustrée à la figure 4. Dans cet exemple, la pile comprend deux électrodes, une de fer (Fe) et l'autre de cuivre (Cu). Un conducteur électrique relie les électrodes, qui sont immergées dans un électrolyte (eau contenant des sels dissous comme du sulphate de cuivre).

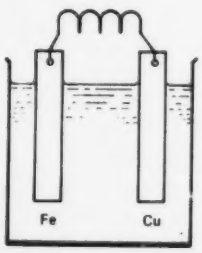


Figure 4

Le fer, en présence d'humidité et d'oxygène, a tendance à revenir à son état stable d'oxyde de fer. Dans la première étape du processus, le fer se dissout sous forme d'ions ferreux (Fe^{++}), libérant deux électrons ($2e^{-}$). Ce processus, appelé réaction anodique et représenté par l'équation 1, rend l'anode (le fer non dissous) négative.

$$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^{-} \qquad (1)$$

Avant que d'autres ions ferreux chargés positivement puissent être relâchés par l'électrode, la charge négative doit être neutralisée. La consommation des électrons se produit lors d'une réaction ayant lieu à l'électrode de cuivre, la cathode. Cette réaction, représentée par

l'équation 2, entraîne la transformation d'eau (H_2O) et d'oxygène (O_2) en ions d'hydroxyde (OH^-).

$$2e^- + \tfrac{1}{2} O_2 + H_2O \rightarrow 2OH^- \qquad (2)$$

Les ions d'hydroxyde et les ions de fer forment un précipité d'hydroxyde ferreux qui, exposé à l'oxygène, se transforme en hydroxyde ferrique, la rouille brune bien connue. L'électrolyte liquide conduit le courant électrique et la pile galvanique peut fonctionner en permanence.

PRÉVENTION DE LA CORROSION

La corrosion des aciers d'armature du béton est causée par une action galvanique. Ainsi, pour éviter la corrosion, il est nécessaire d'éliminer les éléments essentiels au fonctionnement d'une pile galvanique, c'est-à-dire :

1) l'anode, où la corrosion a lieu, et la cathode, qui ne se corrode pas mais qui maintient l'équilibre ionique nécessaire à la corrosion;
2) la continuité électrique entre les zones anodique et cathodique;
3) l'oxygène;
4) l'humidité;
5) les ions de chlorure, qui détruisent l'état passif de l'acier;
6) l'électrolyte entourant les électrodes.

Étudions en détail chacun de ces éléments essentiels pour voir s'il est possible de les éliminer et si une méthode pratique pourrait permettre d'empêcher la détérioration des garages.

Zones anodique et cathodique

La formation de zones anodique et cathodique dans le béton armé ne nécessite pas la présence de deux métaux différents : les variations dans l'acier dues à sa composition chimique, à son état de contrainte ou même à la composition du milieu environnant font qu'une partie de l'acier agit comme cathode et l'autre comme anode (figure 5). Ces variations existent toujours et permettent éventuellement la formation d'une pile galvanique. Il n'est pas pratique ni économique d'essayer d'éliminer ces variations. Il est toutefois important de savoir qu'en enrobant dans le béton d'autres métaux que les armatures d'acier, on peut favoriser la formation de piles galvaniques. C'est pourquoi les conduits de l'installation d'éclairage, par exemple, devraient être montés en surface plutôt que dans le béton.

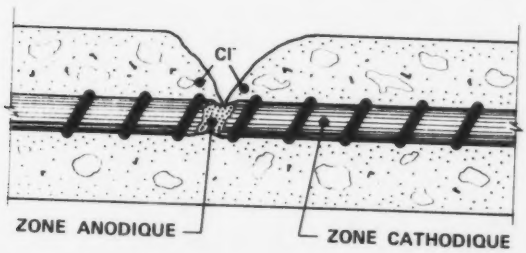


Figure 5

Interruption de la continuité électrique

On peut éviter la création d'une pile galvanique en isolant l'acier d'armature au moyen d'un matériau fortement diélectrique. À l'heure actuelle, un revêtement époxyde lié à l'acier par fusion, utilisé dans la plupart des cas, assure la protection la plus efficace. En cas d'incendie cependant, on craint qu'il se produise un ramollissement de la résine époxyde, qui entraînerait une perte d'adhérence des armatures. Il faut donc s'assurer du degré de résistance au feu des dalles de garage ayant des armatures recouvertes d'époxyde.

Élimination des réactifs

Il est également possible d'enrayer la corrosion de l'acier en empêchant l'oxygène, l'eau et les chlorures de pénétrer dans le béton. Il existe plusieurs moyens d'y parvenir. Si l'on assure un bon drainage de façon à empêcher la formation de flaques d'eau en surface, les contaminants risquent beaucoup moins de s'infiltrer dans le béton. La pente de la dalle, après le retrait au séchage, le fluage et le tassement, devrait être d'au moins 2 %, et les drains devraient être situés aux points bas de la dalle. Il est très important de concevoir, de réaliser et de maintenir en bon état les joints de dilatation de manière à ce qu'ils soient efficaces et durables. Sans ces précautions, l'eau et les sels dissous seront entraînés profondément dans la dalle.

Le nettoyage des garages, bien qu'il soit rarement effectué, est un moyen économique et efficace d'empêcher l'accumulation des sels. La plupart du sel accumulé sur les planchers de garage sous forme de croûtes visibles, les jours secs d'hiver, finira par pénétrer dans le béton s'il n'est pas enlevé. Les dalles devraient être balayées aussi souvent que possible, ou au moins une fois par an, de préférence au printemps.

Bien qu'elles soient importantes, ces mesures sont insuffisantes pour assurer une bonne tenue en service. L'acier d'armature doit être protégé par un béton de bonne qualité et d'une épaisseur suffisante pour éviter tout contact avec la saumure.

CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON

La perméabilité du béton augmente de façon exponentielle avec le rapport eau/ciment (E/C), comme le montre la figure 6. Le béton qui a un faible rapport E/C empêche par conséquent la pénétration du sel, comme on peut le constater à la figure 7. Pour cette raison, on recommande que le rapport eau/ciment du béton destiné aux dalles de garage ne dépasse pas 0,45.

Pour améliorer l'ouvrabilité, la compacité et par conséquent l'imperméabilité du béton, il serait bon d'ajouter un entraîneur d'air (5 à 6 %). L'addition d'un adjuvant au latex dans l'eau avant le malaxage du béton diminue aussi sa perméabilité. Le béton fait de ciment mélangé, c'est-à-dire dans lequel une partie du ciment Portland est remplacée par des cendres volantes, du laitier de haut fourneau ou de la silice fine, est beaucoup moins perméable.

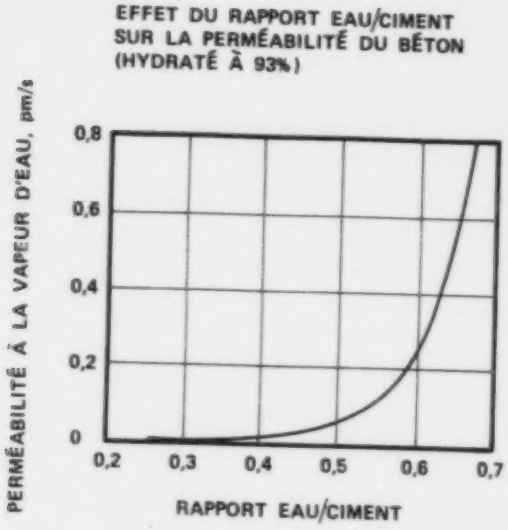


Figure 6 (tirée de la référence 3)

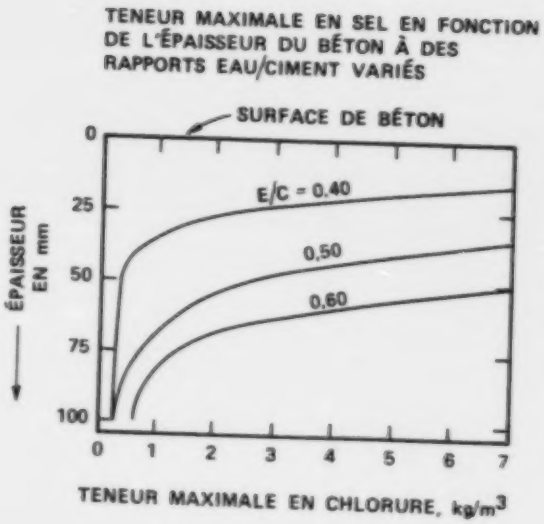


Figure 7 (tirée de la référence 4)

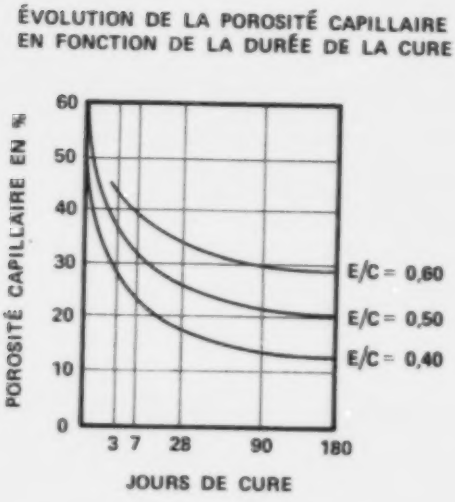


Figure 8 (tirée de la référence 5)

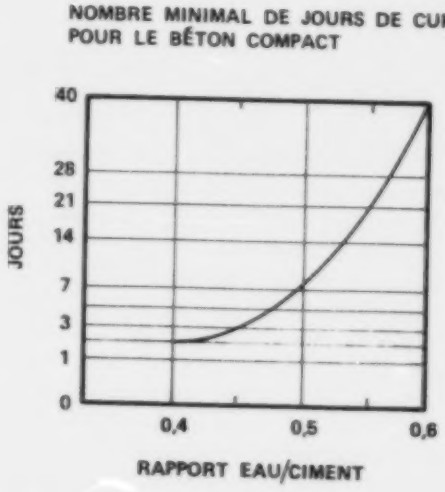
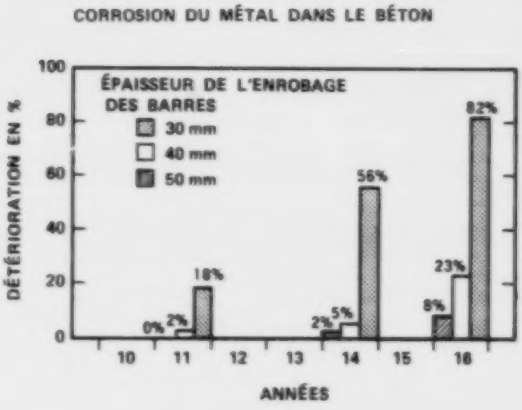


Figure 9 (tirée de la référence 5)

La perméabilité décroît au cours de l'hydratation du ciment en raison de la porosité capillaire, comme l'illustre la figure 8. Une cure adéquate est donc très importante pour que l'hydratation soit la plus complète possible. Le temps minimum prescrit pour la cure des bétons ayant divers rapports eau/ciment est indiqué à la figure 9.

Puisque les chlorures agissent comme catalyseurs pour amorcer la corrosion de l'acier, les composants du béton ne doivent pas contenir des quantités appréciables de chlorures solubles. À cet égard, les granulats et les adjuvants sont à surveiller. L'utilisation d'adjuvants à base de chlorure de calcium devrait être évitée.

ÉPAISSEUR DU BÉTON



L'enrobage des armatures d'acier avec une couche de béton plus épaisse permet d'allonger le parcours de diffusion et de retarder le contact des chlorures et de l'oxygène avec l'acier. La figure 10 indique la relation qui existe entre l'épaisseur d'enrobage et la détérioration des aciers en fonction du temps. La couche recouvrant les armatures supérieures devrait avoir au moins 58 mm d'épaisseur, et celle se trouvant sous les armatures inférieures, au moins 20 mm.

Figure 10 (tirée de la référence 6)

PRODUITS HYDROFUGES

Plusieurs moyens artificiels ont été mis au point pour empêcher la pénétration de l'humidité dans les dalles de béton; mentionnons entre autres les hydrofuges de surface, qui réduisent la perméabilité du béton. Il existe plusieurs types d'hydrofuges, dont la liste figure au tableau 1. Ces produits ont le grand avantage d'être faciles à appliquer et bon marché. Par contre, ils ne peuvent boucher les fissures et ont tendance à s'user. On remarque d'énormes différences entre les produits hydrofuges en ce qui concerne les propriétés qui semblent importantes pour assurer l'étanchéité des planchers de garage, c'est-à-dire l'absorption d'eau, la fluidité et la stabilité. Malheureusement, aucune norme n'existe à l'heure actuelle et le choix doit tenir compte de la performance du produit sur le terrain.

Tableau 1. Enduits pour béton

- Huile de lin bouillie	- Matériaux à base de butadiène
- Caoutchouc chloré	- Silicate
- Revêtement époxyde contenant des polysulfures	- Siliconate
- Revêtement époxyde avec divers additifs solides	- Siloxane
- Matériaux fabriqués à partir d'isobutylène et de stéarate d'aluminium	- Deux types d'uréthane

MEMBRANES D'ÉTANCHÉITÉ

Il est possible de poser des membranes d'étanchéité sur le béton. Ces membranes sont constituées de matériaux divers tels que le polyuréthane, le PVC, le néoprène et l'époxyde, et sont produites en feuilles ou en émulsion. Dans la plupart des cas, il faut appliquer une autre épaisseur, appelée revêtement d'usure, pour protéger la membrane de la circulation. Encore une fois, le choix de la membrane d'étanchéité et de la couche d'usure doit être basé sur la performance obtenue dans le passé.

On utilise parfois une chape de béton de forte densité, généralement de 50 mm d'épaisseur, sans armature et séparée du béton armé par une membrane d'étanchéité à l'eau. Cette méthode donne de bons résultats, car elle empêche la pénétration des contaminants.

INHIBITEURS DE CORROSION

Certains produits chimiques, lorsqu'ils sont mélangés au béton plastique, réduisent nettement la corrosion des aciers. Un de ces produits est le nitrite de sodium. On ne connaît pas encore très bien le mécanisme de fonctionnement de ces inhibiteurs de corrosion, mais on sait que la protection décroît avec le temps en raison de la disparition graduelle du nitrite.

CONCLUSIONS

Garages de stationnement existants

Le choix des travaux de réparation à effectuer dans les garages détériorés pose un problème complexe lorsque l'on veut obtenir un bon rapport coût-efficacité. Comme il serait trop coûteux de remplacer tout le béton ayant une forte teneur en chlorure, il est peu probable que l'on puisse arrêter totalement la corrosion. Le but essentiel des réparations est d'éviter la création de conditions dangereuses et de ralentir la corrosion de sorte que le garage dure aussi longtemps que l'immeuble qui l'abrite. La réhabilitation ne permet pas de transformer un garage mal construit en un garage durable. Comme les réparations recommandées visent à

ralentir le processus de corrosion, un entretien permanent et certaines réparations périodiques seront tout de même nécessaires.

Pour arriver à déterminer la méthode de réparation la plus économique et la plus efficace, il faut procéder à un examen complet du garage. On recommande que l'inspection soit effectuée par un expert-conseil. Le tableau 2 indique les points à examiner. Les détails de l'inspection sont décrits dans le Digest de la construction au Canada n° 225F (Évaluation et réparation des planchers de garage endommagés)[7].

Tableau 2. Garages existants

État au moment de l'inspection
- Intégrité des structures
- Réserve de capacité portante
- Espace libre
- État du système de drainage
- État des joints de dilatation
- Délitage du béton
- Teneur en chlorure du béton
- Inspection visuelle

En supposant qu'il n'y ait pas de problèmes de structure, les travaux de réparation minimaux incluent les étapes suivantes :

1) retirer le béton des zones où il y a délitage;
2) nettoyer à fond les aciers d'armature exposés;
3) revêtir les armatures d'acier de résine époxyde;
4) remplir les vides à l'aide d'un béton de bonne qualité;
5) mettre en place une étanchéité pour assurer une bonne performance, que ce soit un hydrofuge de surface ou une membrane.

Parmi les autres améliorations, citons la possibilité de couler une chape de béton dense et de recourir à une protection cathodique.

Garages neufs

Comme on connaît mieux, à l'heure actuelle, les problèmes qui se posent dans les garages de stationnement, il semble désormais possible de construire des garages qui donneront satisfaction pendant toute la durée de service du bâtiment. On trouvera au tableau 3 des recommandations pour la conception des dalles de garages de stationnement.

Tableau 3. Nouveaux planchers de garages

Exigences minimales
- pente minimale de la dalle : 2 %
- béton à air entraîné
- rapport maximal eau-ciment : 0,45
- couche de béton de 58 mm au-dessus des armatures supérieures
- couche de béton de 20 mm au-dessous des armatures inférieures
- hydrofuge de surface ou
- membrane d'étanchéité recouverte d'une couche d'usure
Options
- armatures revêtues d'époxyde
- ciment au latex
- protection cathodique
- inhibiteur de corrosion

Il n'est pas nécessaire d'appliquer toutes ces mesures à la fois, ce qui par ailleurs serait beaucoup trop coûteux. Toutefois, il faut se souvenir qu'une seule mesure de protection ne suffit pas : il faut en combiner plusieurs. Le degré de protection à assurer dépend de la gravité des problèmes qui risquent de se poser dans le garage. Évidemment, il faut davantage de protection dans un garage commercial que dans un garage résidentiel.

RÉFÉRENCES

1. W.C. Whitman, R.P. Russell et V.J. Altieri, Effect of hydrogen-ion concentration on the submerged corrosion of steel, Industrial Engineering Chemistry, 1924, vol. 16, p. 665-670.

2. Corrosion of reinforcement in concrete construction, A.P. Crane (éd.), Ellis Horwood, Chichester, West Sussex, 1983, 437 p.

3. G.J. Verbeck, Mechanism of corrosion of steel in concrete. Dans Corrosion of Metals in Concrete, American Concrete Institute Special Publication SP 49, Detroit, 1975, p. 21-28.

4. K.C. Clear, Time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete slabs, vol. 3, Performance after 830 daily salt applications, FHWA/RD-76-70, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1976, 67 p.

5. M. Sprecht, The necessary minimum concrete cover of outside structural members and its correlation with curing of the concrete, Cement and Concrete Association (trad.), Slough, 13 feuillets, 1984.

6. C.F. Crumpton et J.E. Bukovatz, Corrosion and Kansas bridges, Transportation Research Record N500, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1974, p. 25-31.

7. G.G. Litvan, Évaluation et réparation des planchers de garage endommagés, CBD 225F, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, 1983.

QUESTIONS ET RÉPONSES

par

J.-C. Perreault, H.E. Ashton et G.G. Litvan

QUESTION 1

Vous avez utilisé l'expression "pare-vent" et l'avez opposée à "pare-vapeur". Pourriez-vous donner des exemples d'utilisation efficace du pare-vent parmi vos réalisations?

RÉPONSE - J.-C. Perreault

Dans un centre commercial construit récemment dans une petite municipalité du nord de l'Alberta, nous avions à résoudre les problèmes d'humidité qu'entraînerait la construction d'une piscine au douzième étage d'une tour de 13 étages. Nous avions prévu l'utilisation d'un mur-rideau en métal et en verre sur toute la hauteur de la tour. Nous savions par expérience que, bien que les murs-rideaux offrent une excellente résistance au passage de l'air et de l'humidité, les exigences spéciales dues à la présence d'une piscine et les conditions climatiques particulièrement sévères du nord de l'Alberta ne pouvaient être satisfaites, à l'époque, par le meilleur mur-rideau.

Afin d'obtenir la performance souhaitée, PCL Construction et l'architecte du projet ont mis au point une stratégie permettant de limiter les fuites d'air et la condensation de la vapeur d'eau dans les deux derniers étages de cette tour. Il a été décidé de construire un mur avec poteaux d'acier du plancher du douzième étage jusqu'au plafond du treizième. La paroi intérieure de ce mur était recouverte de plaques de plâtre jusqu'au plafond suspendu. La paroi extérieure était revêtue de plaques de plâtre recouvertes de feuilles d'aluminium à l'endos, à partir du plancher du douzième étage jusqu'au plancher du treizième. Un espace de ½ pouce a ensuite été prévu derrière le revêtement extérieur, du plancher au plafond du treizième étage. Pour étancher les joints des plaques de plâtre et s'assurer que la structure résistera aux pressions du vent, un ruban de toile renforcée a été appliqué sur les joints. Cette méthode a permis d'obtenir un pare-vent continu du douzième étage jusqu'au toit. Tous les joints ont été recouverts de ruban, y compris les coins, et on a pris soin de limiter la largeur des joints. On a ensuite mis en place six pouces d'isolant thermique sur la surface extérieure des plaques de plâtre et laissé une lame d'air entre l'isolant et le mur-rideau.

Bien que le bâtiment donne l'impression d'être doté d'un mur-rideau sur toute la hauteur, le revêtement extérieur des deux derniers étages est constitué d'un placage. Le mur-rideau est interrompu complètement au niveau du plancher du douzième étage de sorte que les meneaux sont recouverts de capuchons et interrompus par un solin placé sur les tubulures verticales. À partir du douzième étage, le mur-rideau n'a qu'une fonction esthétique.

Comme les deux derniers étages devaient être dotés d'un revêtement extérieur en verre normal, il n'était pas nécessaire d'utiliser des panneaux métalliques à l'intérieur de l'ossature du mur-rideau. L'utilisation de la technique décrite plus haut nous a permis de réaliser des économies considérables. La cavité entre les plaques de plâtre intérieures et extérieures a servi au passage des câbles électriques.

Depuis sa construction il y a quatre ans, l'immeuble se comporte parfaitement. Il n'y a eu aucune plainte concernant des problèmes d'humidité et de condensation dans les deux derniers étages.

En ce qui a trait à d'autres bâtiments, un certain nombre de techniques ont été mises au point afin d'assurer la continuité du pare-vent selon divers types de mur. Par exemple, lorsqu'il est impossible ou peu pratique d'installer des plaques de plâtre revêtues d'aluminium du côté extérieur, on peut utiliser des plaques de plâtre pour jouer le rôle de pare-vent du côté intérieur. Dans ce cas, lorsque le poteau d'acier doit relier le plancher au plafond, on a découvert que la technique du jointoiement et du ruban adhésif utilisée pour les plaques de plâtre pouvait être employée aussi entre les plaques de plâtre et le béton et entre les plaques de plâtre et le contreplaqué. C'est une façon très efficace d'employer les plaques de plâtre du côté intérieur comme pare-vent et d'étancher le joint horizontal avec la dalle de béton. La continuité de ce système est assurée au moyen du jointoiement et du ruban adhésif et le joint de plancher est étanché à l'aide d'un produit de bonne qualité (à base de terpolymères de polyuréthane avec résine époxyde par exemple). Cette technique présente l'avantage de rendre bien visibles les ouvertures qui sont alors faciles à colmater.

L'expérience nous a démontré que les murs de remplissage en blocs de béton, surtout ceux qui sont intégrés à une ossature en béton armé, étaient relativement transparents à l'air. Pour rendre les parois en blocs de béton étanches, plusieurs techniques ont été mises à l'essai. Parmi celles-ci, mentionnons l'utilisation d'un mastic renforcé ou d'un treillis de fibres de verre noyé dans du mastic, avec une deuxième couche de mastic pour dissimuler le treillis. Ces techniques sont au point. Toutefois, elles sont relativement coûteuses et particulièrement difficiles à mettre en oeuvre lorsque les armatures parasismiques doivent se prolonger jusqu'au revêtement extérieur. Une autre technique consiste à utiliser une membrane en élastomère modifiée ou armée du type auto-adhésif ou appliquée à la flamme. Notre compagnie est d'avis que le collage à la flamme est particulièrement efficace lorsque la température est inclémente car la flamme réchauffe et assèche la surface servant de support.

Il n'est pas difficile de construire un pare-vent. Toutefois, ce dernier doit être parfaitement continu sur toutes les surfaces de l'enveloppe du bâtiment, y compris les jonctions mur-toiture-fenêtre. Pour cela, il faut des matériaux capables (aux emplacements les plus critiques) de résister aux fortes pressions exercées par le vent. Bien que la conception de ces pare-vent n'ait pas fait l'objet d'une étude approfondie de la part des ingénieurs, il est absolument indispensable de remplacer les feuilles de polyéthylène et les pâtes à calfeutrer pour isolation acoustique par des techniques plus appropriées.

QUESTION 2

Pourquoi un mastic appliqué à la truelle sur un mur en blocs de béton n'offre-t-il pas une bonne résistance au passage de l'air et de la vapeur?

RÉPONSE - J.-C. Perreault

Un mastic appliqué à la truelle n'est pas un produit d'étanchéité ou de calfeutrage. Par exemple, si un mastic devait se comporter comme un produit d'étanchéité (supporter une fissuration de 1/8 de pouce) et qu'il était de la plus haute qualité, c'est-à-dire ayant une capacité d'extension de 25 %, le joint dans lequel le produit serait appliqué devrait avoir ½ po de large. Un cordon en mousse servant de support intérieur convexe devrait être inséré dans la fissure avant l'application du produit d'étanchéité. Ce dernier devrait être travaillé de manière à ce que son épaisseur au centre soit environ la moitié de celle au niveau des lèvres de la fissure. Il est donc difficile de colmater ainsi une ouverture ou une fissure.

Maintenant, supposons qu'un mastic soit appliqué sur une surface sans fissure à l'origine et que par la suite, des microfissures fassent graduellement leur apparition. Chaque microfissure provoque une extension du mastic correspondante et il est évident que si les produits d'étanchéité conçus pour s'ajuster aux mouvements des fissures et des joints ne peuvent remplir ce rôle, les mastics non plus. En outre, les mastics appliqués à la truelle ont tendance à sécher après un certain laps de temps.

Un mastic appliqué à la truelle réduit la porosité d'une surface en blocs de béton d'environ 90 %. Toutefois, on n'a pas déterminé si cette réduction est suffisante pour empêcher le passage de l'air. Les murs en blocs de béton détrempés par la pluie ont tendance à gonfler. Au contraire, un mur de blocs de béton très humide a tendance à subir du retrait lorsqu'il sèche. Ces deux phénomènes créent des fissures, généralement entre les blocs et à l'interface de la maçonnerie et du ciment. D'autres ouvertures ou fissures peuvent se produire entre le remplissage de maçonnerie et les poutres ou poteaux en béton armé.

C'est pour cette raison que les mastics mis en oeuvre à la truelle ne peuvent jouer le rôle de pare-vent sur une surface en blocs de béton.

QUESTION 3

Est-ce que la mousse d'uréthane a été utilisée comme membrane étanche à l'air et dans quelles circonstances faudrait-il éviter de l'utiliser?

RÉPONSE - J.-C. Perreault

Jusqu'à maintenant, la mousse d'uréthane n'a été utilisée que pour boucher les trous. Ce produit a servi aussi à colmater les ouvertures autour des ancrages des panneaux de béton préfabriqués des murs existants, et s'est révélé efficace entre les platelages de tôles d'acier ondulées et les murs porteurs en blocs de béton ainsi que pour remplir la lame d'air au-dessus

des platelages en tôles d'acier ondulées, si ces derniers ne sont pas recouverts de béton mais font partie d'un système de toiture supportant des panneaux ou un isolant thermique.

Malheureusement, la mousse d'uréthane présente un inconvénient pour la protection incendie. Il a donc fallu trouver un matériau ignifuge compatible avec la mousse d'uréthane. Quelques produits d'application par pulvérisation sont maintenant offerts sur le marché. Une autre technique que notre compagnie a déjà employée consiste à appliquer une couche de plâtre sur des lattes métalliques, permettant ainsi d'obtenir la protection incendie requise.

Une mise en garde doit être faite à propos de l'utilisation de l'uréthane. Il nous est déjà arrivé d'appliquer de la mousse d'uréthane dans la cavité située derrière une surface de béton préfabriqué, tard dans l'année. Le fait de ne pas avoir tenu compte de la température au cours de la mise en oeuvre du matériau a provoqué une désagréable surprise. Au printemps, lorsque la température s'est réchauffée, un des panneaux préfabriqués qui avait été isolé de cette manière s'est décollé du mur à cause de la dilatation de la mousse. Lorsque la cavité a été remplie de mousse, certains produits sont demeurés inactifs durant l'hiver jusqu'à ce que la température s'élève au printemps. La mousse qui ne s'était pas complètement formée en hiver a continué à réagir et à se répandre en poussant le panneau de béton préfabriqué jusqu'à la rupture de ses ancrages. On voit que l'expansion de la mousse d'uréthane dépend de la température de mise en oeuvre et qu'il faut tenir compte du temps de l'année.

Les cavités qui doivent être remplies de mousse ne doivent pas être trop étroites pour éviter le déplacement involontaire des matériaux lorsque la mousse atteint son volume définitif.

QUESTION 4

Puisque les joints des feuilles de polyéthylène fixées au moyen d'agrafes ne sont pas étanches à l'air, quels produits peut-on utiliser pour assurer l'étanchéité de l'ensemble?

RÉPONSE - H.E. Ashton

Les feuilles de polyéthylène doivent être traitées pour que les adhésifs, les produits d'étanchéité ou les revêtements puissent y adhérer. Comme M. Perreault l'a souligné, si on utilise des capuchons de polyéthylène sur les cartouches des produits d'étanchéité, c'est parce que le produit n'y adhère pas. Le traitement comprend des décharges électriques ou l'application de produits chimiques très forts comme de l'acide sulfurique, qui ne conviennent pas à l'utilisation sur un chantier.

Durant l'une des discussions, un fournisseur a affirmé qu'il disposait d'un produit d'étanchéité à base de butyle assurant au polyéthylène une bonne adhérence. Dans l'autre groupe, un participant a déclaré avoir obtenu une bonne adhérence avec des films de polyéthylène de 4 mil (100 mm) et plus, recouverts d'acétone au pourtour et agrafés ensemble. D'autres sont d'avis

que, quel que soit l'adhésif ou le produit d'étanchéité utilisé entre les feuilles, le joint ne permet pas d'assurer la continuité du polyéthylène. Dans les maisons, où les poteaux d'ossature sont rapprochés les uns des autres, le produit d'étanchéité n'agit que comme garniture et le joint résiste tant et aussi longtemps que les plaques de plâtre et les poteaux le retiennent fermement; le produit d'étanchéité peut alors empêcher le passage de l'air par le joint. Les bâtiments de grande dimension n'offrent pas un support suffisant; lorsqu'elles peuvent se déplacer, les feuilles de plastique flottent comme une voile de bateau jusqu'à ce qu'il y ait rupture. Lorsqu'elles sont placées contre l'isolant, elles le tassent dans la cavité où il devient inefficace.

QUESTION 5

Vous serait-il possible de faire quelques commentaires sur l'utilisation d'un produit d'étanchéité pénétrant pour rendre la maçonnerie ou le béton imperméable?

RÉPONSE - H.E. Ashton

Tout d'abord, il faut remarquer que le terme "imperméable" n'est pas approprié. Un matériau imperméable empêche le passage de l'eau sous une pression hydrostatique. La plupart de ces matériaux sont noirs, renforcés et appliqués à une épaisseur d'au moins 50 mil (1,25 mm). Les produits d'étanchéité pénétrants sont des produits hydrofuges; par définition, ils résistent au passage de l'eau en l'absence de pression hydrostatique. Par conséquent, les produits hydrofuges ne font que retarder l'absorption capillaire. Cette caractéristique est souvent mal comprise lorsqu'on affirme qu'ils n'empêchent pas l'évaporation de la vapeur d'eau de l'intérieur du support.

Avant de choisir un produit d'étanchéité pour la maçonnerie, la première chose dont il faut tenir compte est sa fonction: doit-il empêcher des désordres ou corriger un problème? S'il s'agit d'empêcher que la pluie mouille un mur de blocs de ciment ou de béton, les produits d'étanchéité conviennent à cet usage. Cependant, ils ne devraient pas être utilisés pour empêcher l'eau de pénétrer à l'intérieur des murs par les fissures dans le béton, ou entre les briques et le mortier. Ces produits ne remplissent pas les fissures, car ils se rétractent à cause de leur faible viscosité et de leur tension superficielle. Dans bien des cas, si les joints entre les briques et les blocs de béton sont refaits, il ne sera pas nécessaire d'appliquer un produit d'étanchéité. Si les défauts ne sont pas corrigés, l'application d'un tel produit sur une surface de maçonnerie par temps froid n'est pas recommandée et peut causer plus de mal que de bien. En effet, si une quantité suffisante de vapeur d'eau pénètre dans le mur, le taux abaissé de transmission de la vapeur d'eau à la surface de la maçonnerie peut provoquer un écaillement en cas de gel si les briques ou les blocs de béton sont saturés d'eau. Par conséquent, l'utilisation des produits d'étanchéité dépend surtout du rôle qu'ils doivent jouer, du climat où ils sont utilisés et des conditions particulières du mur.

QUESTION 6

Les tôles d'une toiture métallique de sept ans sont très rouillées aux extrémités et autour des têtes de vis. Le constructeur prétend qu'il s'agit d'une conséquence des pluies acides. Qu'en pensez-vous?

RÉPONSE - H.E. Ashton

La corrosion est peut-être due à la rosée ou au gel si les tôles ont été mises en place de telle sorte qu'il se produit de la condensation aux extrémités ou dans les creux. On ne peut mettre en cause la pluie qui ruisselle rapidement en surface. De plus, la rosée et le gel sont beaucoup plus acides que la pluie. Il ne s'agit pas d'une découverte puisque ce fait a déjà été observé en 1909 dans une étude à laquelle on a ensuite fait référence quelque 25 années plus tard et qui est par la suite tombée dans l'oubli pendant près de 50 ans, jusqu'à ce que des chercheurs de la Section des matériaux de construction la retrouvent. La conclusion de cette étude est que : "Même dans les atmosphères fortement polluées, l'action lessivante de la pluie est généralement bénéfique (mais) la rosée plus acide se déposerait même dans les espaces abrités".*

La condensation a un effet corrosif beaucoup plus important que la pluie. Ce phénomène a d'ailleurs été observé sur un toit en acier galvanisé de grande dimension à Ottawa. À certains endroits, sous une série de panneaux de capteurs solaires, le zinc s'était dissous et le support en acier avait été attaqué par la rouille. Les capteurs étant faiblement inclinés afin d'assurer le drainage des fluides, cette inclinaison a favorisé un écoulement de la rosée et de l'eau de fonte vers l'une des extrémités, et une accumulation d'eau sous le capteur. On a remarqué aucun signe de corrosion aux endroits où la toiture était uniformément délavée par la pluie. La pluie acide n'est donc pas la cause de la corrosion.

QUESTION 7

On dit qu'une protection cathodique empêche toute corrosion. Après avoir installé une protection cathodique lors de la remise en état d'un garage, doit-on prendre d'autres mesures de protection comme l'application d'un hydrofuge de surface?

RÉPONSE - G.G. Litvan

Les mesures proposées reposent fortement sur le principe d'une protection multiple. Les garages sont exposés à des conditions extrêmement sévères. Même une défaillance temporaire du système de protection peut provoquer des dommages. À la longue, des problèmes comme la rupture de la membrane, l'usure du produit d'étanchéité ou la fissuration du revêtement de béton peuvent surgir. L'expérience prouve qu'il ne faut pas compter sur l'entretien pour rectifier ces défauts au moment de leur apparition.

---

*Cité par H.E. Ashton et P.J. Sereda en 1982 dans "Environment, Microenvironment and Durability of Building Materials", Durability of Building Materials, 1 : 49-65.

QUESTION 8

Existe-t-il des publications sur les aspects pratiques de la réparation des garages et sur leur construction?

RÉPONSE - G.G. Litvan

La réparation des garages est un sujet relativement nouveau sur lequel il existe peu de documents. Citons les Digests de la construction au Canada n° 224 et n° 225 pour la construction des garages et le Bulletin technique n° 7 de la Société canadienne d'hypothèques et de logement pour la formulation des lignes directrices. Le comité permanent des structures de stationnement de l'Association canadienne de normalisation et le comité des membranes de polymère applicables sous forme liquide pour les stationnements de l'Office des normes générales du Canada préparent des normes dans leurs domaines de compétence, mais elles ne sont pas encore disponibles.

QUESTION 9

L'emprisonnement de l'humidité risque-t-il d'accélérer la corrosion de la dalle lorsque la membrane d'étanchéité est mise en place après les réparations?

RÉPONSE - G.G. Litvan

Il n'y a pas eu de cas observé jusqu'à maintenant. La réduction de l'humidité semble atténuer le processus de corrosion en dépit de la présence des ions de chlorure dans les zones non réparées.

QUESTION 10

On a dit qu'il fallait s'attendre à effectuer d'autres réparations après avoir remis en état un garage détérioré. Pourriez-vous faire quelques commentaires à ce sujet?

RÉPONSE - G.G. Litvan

Comme la remise en état était nécessaire, nous pouvons supposer que la teneur en sel du béton était supérieure à la valeur critique. Dans les zones où s'est produite une perte d'adhérence, du béton neuf a été mis en place là où des réparations ont été effectuées, ce qui a entraîné une concentration inégale de chlorures autour des armatures d'acier. Ceci a conduit à la formation de cellules de concentration. Dans ce cas, l'acier des zones sans sel joue le rôle de cathode non corrosive et l'acier des zones contaminées celui d'anode, provoquant ainsi un déplacement de la corrosion. Pour contrer cet effet, on recommande d'enduire l'acier d'une résine époxyde pour briser la continuité du circuit électrique.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Pour ceux ou celles qui voudraient approfondir le sujet de cette conférence, voici une liste de publications qui peuvent être obtenues sans frais de la Section des publications, Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, Canada, K1A 0R6.

Emploi des matériaux de calfeutrement par G.K. Garden	CBD 96F
Les revêtements pour éléments métalliques extérieurs des bâtiments par H.E. Ashton	CBD 98F
Comportement des matériaux de construction par P.J. Sereda	CBD 115F
Conception et durée de vie utile par G.K. Garden	CBD 120F
Humidification et séchage des matériaux poreux par P.J. Sereda et R.F. Feldman	CBD 130F
Le mouvement des joints et le choix du matériau de calfeutrement par G.O. Handegord et K.K. Karpati	CBD 155F
Recommandations générales pour le peinturage des bâtiments par H.E. Ashton	CBD 172F
Détérioration des garages de stationnement par G.G. Litvan	CBD 224F
Évaluation et réparation des planchers de garage endommagés par G.G. Litvan	CBD 225F